

Sistema de posicionamiento, automatización, muestreo y control para la fabricación en tres dimensiones utilizando el láser como herramienta

Autor: Javier Lamas Vigo

Tesis doctoral UDC / Año 2015

Director: Alberto Ramil Rego

Programa de doctorado en Ingeniería Industrial



UNIVERSIDADE DA CORUÑA

Abstract

Multi-axis systems, sampling and control for automation of Laser assisted 3D machining: A practical example of robotized laser cladding system

Javier Lamas Vigo

*Department of Ingeniería Industrial II
Universidade da Coruña*

This thesis presents a method to develop a system that allows the full automation of the core laser manufacturing steps. This system includes a flexible CAD/CAM software developed using a FOSS approach and support hardware, based in OSHW whenever is possible, that allow to control a wide range of laser processes. The system is designed to be less prone to operator errors, monitor and save the relevant sensor data obtained from different optical sensors, improve the quality of the final results using a control system and short long lead times related to time consuming tasks that not add value. Different algorithms that allow to follow a 3D path across user-selected geometry at constant velocity with high precision are discussed. A method to modify the support hardware elements to be flexible enough to work alone like active nodes of an ethernet network regardless of the kind of laser process is proposed and tested. An optical method is used to obtain geometrical data of the surface that is processed and turned into an easy editable 3D model through inverse engineering. A method to use both raw geometrical data and a preprocessed or edited 3D model to simplify the generation of the user desired paths and modify the above-mentioned surface is described. These paths are calculated using different patterns and laser tool orientations to fulfill the particular requirements of different tasks. Overall methods are validated mainly by mean of different laser cladding tests carried out with an industrial 6DoF robot. In part of these tests the laser power is controlled by the PID controller using a photodiode sensor signal like control input. Support hardware systems needed for the cladding process are monitorized and controlled by the CAD/CAM software during the tests. DMD building tests are carried out to evaluate the combination of the different parts of the system working together.

KEYWORDS: Computer Aided Manufacturing, Laser cladding, PID control, Laser scanner, Optical sensors, Robot, 3D reconstruction, 3D tool-path generation

Resumen

Multi-axis systems, sampling and control for automation of Laser assisted 3D machining: A practical example of robotized laser cladding system

Javier Lamas Vigo

Departamento de Ingeniería Industrial II
Universidade da Coruña

Esta tesis presenta un conjunto de metodos que permiten el desarrollo de un sistema para llevar a cabo la automatizacion de las etapas basicas de un proceso de fabricacion laser. El sistema incluye software CAD/CAM, desarrollado usando un enfoque basado en FOSS, y hardware auxiliar, basado en OSHW en la medida de lo posible, que permite controlar gran numero de procesos laser. El sistema esta diseñado para reducir los errores del usuario, monitorizar y almacenar los datos relevantes obtenidos a partir de diferentes sensores opticos, mejorar la calidad de la pieza resultante empleando un sistema de control y recortar tiempos mediante la reduccion de tareas repetitivas manuales que no aportan valor. Se han analizado diferentes algoritmos que permiten recorrer una trayectoria descrita por el usuario sobre una geometria determinada a velocidad constante con alta precision. Se ha propuesto y probado un metodo para efectuar modificaciones en los elementos hardware auxiliares para convertirlos en nodos activos de una red ethernet que puedan funcionar de modo independiente y sin restricciones en relacion a la tipologia del proceso. Se ha propuesto un metodo optico para obtener datos geometricos de la superficie que esta siendo procesada y convertirlos mediante ingenieria inversa en un modelo 3D facilmente editable. Se ha descrito un metodo para emplear los datos geometricos originales y el modelo 3D para facilitar la generacion de trayectorias a realizar. Las trayectorias se calcularan usando diversos patrones y orientaciones de la herramienta que permitan cumplir los requisitos del procesado. Los metodos previamente descritos se han validado mediante experimentos realizados empleando la tecnica de laser cladding y un robot industrial de 6 grados de libertad. Parte de los experimentos se han llevado a cabo empleando un controlador PID retroalimentado por la señal de un fotodiodo. Los sistemas hardware auxiliares han sido monitorizados y controlados mediante el software CAD/CAM durante los experimentos. Se han llevado a cabo experimentos de fabricacion mediante DMD para validar el funcionamiento global del sistema.

PALABRAS CLAVE: Computer Aided Manufacturing, Laser cladding, control PID, Escaner laser, Sensores Opticos, Robot, Reconstruccion 3D, Generacion de trayectorias 3D

Resumen

Multi-axis systems, sampling and control for automation of Laser assisted 3D machining: A practical example of robotized laser cladding system

Javier Lamas Vigo

*Departamento de Enxeñería Industrial II
Universidade da Coruña*

Esta tese presenta un conxunto de metodos que permiten o desenvolvemento dun sistema para acadar a automatizacion das etapas basicas dun proceso de fabricacion laser. O sistema inclue software CAD/CAM, desenvolvido empregando un enfoque baseado no FOSS, e hardware auxiliar, baseado en OSHW na medida do posible, que permite controlar un grande numero de procesos laser. O sistema esta deseñado para reducir os erros do usuario, monitorizar e almacenar os datos relevantes obtidos a partir de distintos sensores opticos, mellorar a calidade da peza resultante empregando un sistema de control e recortar tempos mediante a reduccion de tarefas repetitivas manuais que non aportan valor. Analizaronse distintos algoritmos que fan posible recorrer un trazado descrito polo usuario sobor dunha xeometria determinada a velocidade constante con elevada precision. Propuxose e probouse un metodo para facer cambios nos elementos hardware auxiliares co fin de convertelos en nodos activos dunha rede ethernet que poidan funcionar de modo independente e sen restriccions en relacion á tipologia do proceso. Propuxose un metodo optico para obter datos xeometricos da superficie que estea sendo procesada e convertelos mediante enxeñería inversa nun modelo 3D sinxelo de editar. Describiuse un metodo para empregar os datos xeometricos orixinais e o modelo 3D para facilitar la xeracion de trazados a levar a cabo. Os trazados calcularanse empregando diversos patrons e orientations da ferramenta que permitan cumprir os requisitos do procesado. Os metodos previamente descritos validaronse mediante experimentos realizados empregando a tecnica de laser cladding e un robot industrial de 6 graos de liberdade. Parte dos experimentos levaronse acabo empregando un controlador PID retroalimentado mediante sinais procedentes dun fotodiodo. Os sistemas hardware auxiliares foron monitorizados e controlados mediante o software CAD/CAM mentras se levaban a cabo os experimentos. Levaronse a cabo experimentos de fabricacion mediante DMD para validar o funcionamento global do sistema.

PALABRAS CLAVE: Computer Aided Manufacturing, Laser cladding, control PID, Escaner laser, Sensores Opticos, Robot, Reconstruccion 3D, Xeracion de trazados 3D

Agradecimientos

Esta es quizas la parte mas importante del presente trabajo, porque sin todos los que aqui se mencionan no hubiese sido posible, así que, aunque lleve mi nombre, esto es vuestro. Comienzo...

En 2005 empecé este fantástico viaje, me quedaban pocas asignaturas pendientes y me ofrecí a trabajar en el LAIL para poder aprender algo mientras terminaba la carrera... jamás me había imaginado que encontrar tu vocación fuera tan casual. Encontre un mundo en que la gente se peleaba con problemas que nadie había resuelto, mi cuerpo y mi mente viajaron a sitios que no hubiera imaginado, tropecé mil veces y la frustración me hizo fruncir el ceño otras mil, viví algunos momentos de iluminación y finalmente me convertí en alguien que sabe que, aunque jamás podrá aprenderlo todo, va a intentarlo, para regalárselo a otros, porque eso es ser científico. Por el camino perdí muchas cosas, encontré otras y después de muchas vueltas, cambiar de vida unas cuantas veces, y tener que dejar el laboratorio sin dejarlo del todo, he conseguido completar el destilado de seis años de trabajo, que ha cristalizado en este texto.

En lo personal, ¿a quien no dar las gracias?. Alberto Ramil, no sabía por donde empezar si tuviese que contabilizar lo muchísimo que me has enseñado, solo puedo decir que siempre serás mi maestro y espero poder regalarte alguna vez un reloj que jamás hayas visto. Carlos Alvarez, por dejarme tus hombros para ver más lejos y enseñarme que los ingenieros de verdad nos manchamos las manos. Armando Yañez, por confiar en mí y en otra gente con ganas de aprender. Jose Manuel Amado, Cote Tobar y Eva Diaz, mis conejillos de indias involuntarios e investigadores incansables. Javier Montero, primer becario y escudero excepcional, espero haberte servido de algo. Ana Jesus Lopez, creo no hay nadie que me haya dicho más veces la palabra tesis con más razón y cariño. Pau Fiorucci y Ema Boaglio, por descubrirnos a mi mujer y a mí que teníamos familia en el hemisferio sur. A Fabio Vincitorio, por enviarnos a esos dos locos y porque cada vez que nos vemos descubro algo nuevo. A los hombres del norte de la LTU, por darme una casa lejos de casa y hacerme el honor de ser uno más (I will translate this for you some Monday!). A mis amigos, pocos, pero de los mejores, por vivir aventuras inconclusas y estar ahí cuando os necesito. A mi cuadrilla de alegres minions de SMT, por guardar el fuerte mientras cocinaba este documento y acompañarme hasta las puertas del infierno.

Por último, porque los seres humanos siempre dejamos lo más importante para el final y a veces no nos da tiempo a hacerlo... A toda mi familia, a los que están y a los que me hicieron como soy y ya no tengo, no os olvido. Mención especial a mis padres, porque me dieron la oportunidad de serlo todo y equivocarme las veces que hiciera falta, os lo digo muy pocas veces, pero os quiero. Y, sin duda, a quienes más tengo que agradecer, Rebe y Dario, las dos estrellas que busco cada mañana, por todo el tiempo que os robo para cosas como esta, porque conocéis la naturaleza del escorpión y seguís ahí.

Al lector, yo he aprendido mucho escribiendo el pequeño volumen que tiene entre manos, espero que tenga la fortuna de que le suceda lo mismo leyéndolo, a pesar de los inevitables errores que haya podido cometer al redactarlo y la torpeza de mi prosa.

Javier Lamas Vigo
Ferrol, Septiembre 2015

Abreviaturas

CAM	Computer Aided Manufacturing
CAD	Computer Aided Design
DAQ	Data acquisition
DMD	Direct Metal Deposition
DoF	Degrees of Freedom
FOSS	Free and Open Source Software
fps	frames per second
FTP	File Transfer Protocol
GUI	Graphic User Interface
HAZ	Heat-Affected Zone
IDE	Integrated Development Environment
NC	Numerical control
Nd:Yag	Neodymium:yttrium aluminum garnet
Nd:YVO4	Neodymium:yttrium orthovanadate
NURBS	Non-uniform rational B-spline
OS	Operating System
OSHW	Open Source Hardware
PID	Proportional Integral Derivative
ROI	Region Of Interest
RTC	Real Time Computing
RTOS	Real Time Operating System
SDK	software development kit
TCP	Tool Center Point

Índice general

Abstract	II
Agradecimientos	V
Abreviaturas	VI
1. Introduccion	1
1.1. Ventajas y retos del láser como herramienta	1
1.2. Objetivo	3
1.3. Alcance y limitaciones	3
1.4. Principales contribuciones	4
1.5. Estructura de la tesis	5
1.5.1. Contexto	5
1.5.2. Esquema general	6
2. Montaje experimental	9
2.1. Prerrequisitos	11
2.2. Montaje para cladding	12
2.2.1. Laser cladding	12
2.2.2. Descripcion global	13
2.2.3. Brazo robotico, sistema de rotacion y controlador	16
2.2.4. Sistema laser para cladding	17
2.2.5. Fotodiodo IR	17
2.2.6. Camara CMOS	18
2.2.7. Pirometro	19
2.2.8. Escaner laser	19
2.2.9. Alimentador de polvo	21
2.2.10. Sistema de sincronizacion y automatizacion	22
2.2.11. Tarjeta de adquisicion de datos	22
2.2.12. Sistema autonomo de adquisicion de datos y control	24
2.3. Montaje para micromecanizado	24
2.3.1. Micromecanizado laser	24
2.3.2. Descripcion global	25
2.3.3. Platinas de traslacion motorizadas y controlador	25
2.3.4. Sistema laser para micromecanizado	26
2.4. Montaje para soldadura hibrida laser-arco	27
2.4.1. Soldadura hibrida laser-arco	27
2.4.2. Descripcion global	27
2.4.3. Portico, desplazador lineal y controlador	29
2.4.4. Sistema para soldadura hibrida laser-arco	29
2.4.5. Cabezal de seguimiento de linea	30

2.4.6.	Camara de alta velocidad	30
2.4.7.	Sistema de soldadura GMAW	31
2.4.8.	Sistema de laser pulsado de diodo para iluminacion	31
3.	Generacion de trayectorias	33
3.1.	Conceptos generales	35
3.1.1.	Definicion de punto central de herramienta (TCP) en un espacio tridi- mensional	35
3.1.2.	Sistemas de referencia de trabajo	36
3.2.	Construccion de trayectorias	38
3.2.1.	Elementos geometricos simples	38
3.2.2.	Elementos auxiliares de union	41
3.2.3.	Curvas complejas	45
3.2.4.	Trayectoria a partir de secuencia de puntos 3D libres	52
3.2.5.	Acondicionamiento de tramos de inicio y fin de trayectoria	54
3.3.	Almacenamiento de trayectorias	55
3.4.	Realizacion de trayectorias mediante sistema robotizado	58
3.4.1.	Conceptos generales	58
3.4.2.	Caso de ejemplo: Sistema de brazo robotizado y posicionador	59
3.4.3.	Brazo robotizado IRP 2400/16	60
3.4.4.	Sistemas de coordenadas de IRP 2400/16	60
3.4.5.	Problema directo	62
3.4.6.	Problema inverso: Desacoplo cinematico	65
3.4.7.	Orientacion de la herramienta respecto de la trayectoria	71
3.4.8.	Posicionador de 2 ejes IRBP	72
3.4.9.	Conversion de trayectorias genericas a comandos del sistema robotizado	74
4.	Muestreo de datos y sistema de control	77
4.1.	Muestreo de datos	79
4.1.1.	Analisis de muestreo en laser cladding	81
4.1.2.	Analisis de muestreo en soldadura hibrida laser-arco	83
4.2.	Sistema de control	84
4.2.1.	Control de lazo abierto para laser cladding	86
4.2.2.	Control de lazo cerrado para laser cladding	86
5.	Obtención de modelos de superficies	89
5.1.	Obtencion de nube de puntos	90
5.2.	Determinación de la posición del sistema de referencia de la herramienta respecto del sistema absoluto del equipo	92
5.2.1.	Caso particular: Determinación de la posición del sistema de referencia del escáner MEL respecto del sistema absoluto del robot	92
5.3.	Interpolacion de puntos a distancias uniformes	92
5.4.	Superposicion de pasadas de escaneado	95
5.5.	Aproximacion de puntos no validos o no presentes	99
5.5.1.	Busqueda de puntos vecinos a puntos no validos o no presentes	100
5.5.2.	Generacion de plano auxiliar	101
5.5.3.	Calculo de paraboloide de ajuste y aproximacion de puntos	102
5.6.	Metodologia de resolucion del problema de sombras	103

6. Metodos para procesamiento laser usando modelos de superficies y volúmenes	107
6.1. Generación de trayectorias sobre una superficie	107
6.1.1. Algoritmo de Bresenham	108
6.1.2. Simplificación de puntos de la traza	110
6.1.3. Generación de múltiples trayectorias mediante selección de áreas	111
6.2. Generación de trayectorias a partir de volúmenes	111
6.2.1. Triangularización de Delaunay	113
6.2.2. Corte de superficies 3D en STL y generación de áreas	114
6.2.3. Relleno de áreas	118
6.2.4. Fabricación y relleno 3D empleando múltiples volúmenes	124
7. Resultados experimentales	131
7.1. Ejemplo de recubrimiento de materiales compuestos con diferente concentración	131
7.2. Ejemplo de muestreo y efecto de sistema de control	131
7.2.1. Caso de recubrimiento de tubo	132
7.2.2. Caso de fabricación de pared vertical	133
7.3. Ejemplo de mapeo de superficie	135
7.3.1. Caso de uso para análisis cuantitativo de soldadura híbrida	135
7.4. Ejemplo de proceso de generación de trayectorias a partir de una superficie es-	
caneada	136
7.4.1. Obtención de superficie escaneada	136
7.4.2. Generación de trayectorias	137
7.4.3. Caso de uso de recorrido de trayectoria sobre alabe con brazo robótico .	138
7.5. Ejemplos de fabricación y tratamientos de superficie	142
7.5.1. Ejemplos de rellenos de polígonos	143
7.5.2. Ejemplos de recubrimientos	143
7.5.3. Ejemplos de fabricación	145
8. Conclusiones y líneas de trabajo futuras	149
8.1. Conclusiones	149
8.2. Líneas de trabajo futuro	151
A. Anexo	161
A.1. Rotación de sistemas de referencia	161
A.1.1. Cambio de referencia ortonormal.	161
A.1.2. Forma matricial de una rotación	162
A.2. Ángulos y rotaciones de Euler.	163
A.2.1. Ángulos de Euler.	163
A.2.2. Eje de rotación y ángulo girado.	165
A.2.3. Determinación de los ángulos de Euler desde la matriz de rotación. . . .	165
A.3. Cuaternios	165
A.3.1. Expresión de una rotación mediante un cuaternio	167
A.4. Algoritmo Denavit-Hartenberg	167
A.5. Características IRP 2400/16	169
A.5.1. Dimensiones	169
A.5.2. Cargas	169
A.5.3. Rangos y velocidades	170
A.6. Características IRBP 500A	170
A.6.1. Datos técnicos	170
A.6.2. Tabla de cargas	171
A.6.3. Dimensiones	171

A.7. Formato STL	171
A.7.1. Especificaciones de formato	172
A.7.2. Modos de almacenamiento	173

Capítulo 1

Introduccion

1.1. Ventajas y retos del láser como herramienta

El láser se ha empleado como herramienta en procesos de mecanizado desde hace cinco décadas, sobre todo en procesos de corte de precisión y soldadura, y hoy en día esta encontrando un nicho de mercado cada vez más importante en aplicaciones tradicionalmente realizadas con máquinas herramientas de mecanizado, manuales o de control numérico. Ello es debido fundamentalmente a que, en un contexto económico como el actual y el previsible en el futuro cercano, donde un cliente puede acceder a un número cada vez mayor de distribuidores, sin importar el punto del planeta en el que se ubiquen, el aumento de calidad y la disminución de costes se hacen todavía más importantes que antaño, siendo esto particularmente cierto en el caso de aplicaciones especiales con alto valor añadido o requisitos muy exigentes como la elaboración o tratamiento de series cortas de piezas, piezas únicas y/o de gran complejidad, elementos con acabado de calidad extrema, limpieza de superficies que no pueden someterse a procedimientos química o mecánicamente agresivos, eliminación de residuos peligrosos, etc... y el uso de la tecnología láser, debido a sus especiales características, es adecuado para estas aplicaciones, ya que:

- Es flexible, lo que permite adaptar la máquina al proceso a realizar de un modo sencillo sin necesidad de ampliar o modificar físicamente el sistema, lo que redundaría en un menor coste de producción a pesar del gran coste inicial del equipo. Esto es cierto sobre todo en el caso de los sistemas multipropósito o en aquellos empleados a nivel I+D, puesto que, las máquinas industriales más grandes y especializadas están optimizadas para la realización de muy pocas tareas con una calidad y velocidad inigualables a un precio competitivo, a costa, claro está, de tener un sistema rígido, cerrado y con una interfaz reducida a la mínima expresión a fin de que el nivel de cualificación de su operador sea lo menos exigente posible y redunde en un coste de formación y personal reducido.
- No existe desgaste físico de la parte de la herramienta que realiza la tarea, ya que este es un haz de luz, lo que permite su uso continuo sin modificar los parámetros del proceso o efectuar cambios de herramienta (no así del propio sistema que genera el haz, que sí se ve sometido a la degradación por el uso). En una máquina tradicional es necesario controlar los suministros de herramientas, la vida útil de las mismas y el efecto que tendrá su degradación sobre la calidad final del producto. Todos estos parámetros adicionales a controlar incrementan los costes de la máquina, no solo debido a la inversión en tiempo y dinero, si no la necesidad de crear una infraestructura técnica y humana, por pequeña que sea, dotada de una formación específica y recursos que se encargue de ello. Esto se agrava más todavía en los casos particulares anteriormente comentados, dado que, en general, el factor experiencia de dicha infraestructura en trabajos con series cortas o únicas es muy

pequeño o inexistente, lo que redundaría en una inversión en tiempo y consumo de recursos aun mayor por parte de la misma.

- Su coste de mantenimiento y uso de fungibles es notablemente inferior al de cualquier máquina CNC corriente, ya que no es necesario sustituir periódicamente las herramientas, aunque, sin embargo, su consumo eléctrico sea mucho mayor. Es importante reseñar que en una economía globalizada como la presente, al aumentar el número de consumidores, es previsible un aumento continuo de los precios de suministros como el que se está dando en la actualidad, debido tanto a la escasez de materias primas como al crecimiento de la demanda. En cuanto a la energía, debido a que debe ser producida localmente, aunque se ve sometida al mismo proceso, el efecto es mucho más suave (no debemos olvidar que el ciclo económico actual se caracteriza en los países industrializados, a pesar de lo que pueda parecer, por tener fácil acceso a una energía barata).
- Su coste global, pese a ser elevado, en muchos casos es menor al que supondría reconfigurar una máquina tradicional para llevar a cabo tareas de las características antes mencionadas, y, en otros, es la única opción que permite obtener el resultado deseado. Es por ello que no tiene sentido hablar, en general, de eficiencia o rendimiento en lo que se refiere a consumo energético de un láser, así como tampoco lo tiene postular su uso industrial para cualquier tipo de tarea. Debe comprenderse, por tanto, que, aunque con un láser pueden realizarse gran número de procesos, no siempre resulta adecuado o rentable hacerlo a nivel industrial.

Vistas las ventajas, deben comprenderse también las carencias detectadas en la tecnología que han hecho necesaria la realización del presente trabajo. Se ha observado que existe una problemática común asociada a los sistemas de mecanizado y tratamiento de superficies, incluso en el caso de que no se trate de herramientas láser, aunque si es más acusado en su caso debido a lo estricto de las condiciones de uso de este tipo de herramientas, sobre todo en los más flexibles, que consiste en el hecho de que el usuario conoce perfectamente el objetivo que pretende alcanzar (entendiendo en este caso como objetivo, por ejemplo, la realización un determinado desplazamiento sobre una pieza compleja empleando una herramienta láser, aplicando una potencia que produzca un incremento de temperatura deseado en cada uno de los puntos tratados y con una velocidad determinada, de modo repetible y sin errores) pero resulta notablemente difícil ejecutar de modo sencillo el proceso, o dicho de otro modo, trasladar al mundo físico el conjunto de tareas que permiten que se cumpla el objetivo previsto. Esto es especialmente cierto en el ámbito de la experimentación o I+D+i, así como en la industria de pequeñas series, pieza única o reparación de piezas, ya que rara vez los procesos siguen unos patrones que se puedan considerar continuos, como si suele suceder en la industria productiva de grandes series (ver [15]).

Una de las principales causas de este problema es la falta de *interfaces* sencillas que permitan utilizar los sistemas para obtener los resultados deseados del modo más inmediato, sin dedicar esfuerzo al aprendizaje de los comandos y peculiaridades de las máquinas auxiliares, que aunque son esenciales para llevar a cabo los procesos, no están relacionadas con la mecánica básica del mismo y el conocimiento de las mismas no es el que aporta un valor añadido al tratamiento. En muchos casos, es necesario dedicar más tiempo a la preparación del proceso que al proceso en sí mismo, siendo las tareas asociadas a dicha preparación repetitivas, complejas y susceptibles de provocar errores.

Una posible resolución a este problema pasa por automatizar las tareas a realizar (ver [38]), tanto para ahorrar tiempo como para evitar tener que efectuar repeticiones debido a fallos evitables. Adicionalmente, es posible mejorar la flexibilidad, calidad y la repetibilidad, si todos los sistemas auxiliares se controlan mediante un sistema maestro global, que permita variar los parámetros del proceso en función de las necesidades y aporte nuevas alternativas de uso

al conjunto. Este proceso dista de ser trivial en muchos casos, dado que los sistemas rara vez estan diseñados para funcionar integrados en un sistema de modo automatizado (ver [14]).

Aunque existen alternativas comerciales que permiten llevar a cabo parte de las tareas comentadas de modo automatico, normalmente se trata de sistemas centrados en produccion, que no son sencillos de utilizar, son costosos y cuya flexibilidad es limitada, puesto que en general se trata de herramientas *software* de codigo cerrado y modulos *hardware* poco documentados o deliberadamente ofuscados y su ampliacion, por lo que los cambios necesarios para adaptar el sistema a nuevos requisitos o procesos resulta muy dificil, o directamente imposible en ciertos casos.

Es por ello que resultaria beneficioso, especialmente si se trata de procesos que se van a llevar a cabo empleando una herramienta laser, disponer de un sistema de automatizacion, facil de utilizar por los usuarios que tienen conocimientos del proceso pero no necesariamente del sistema que lo realiza, que permita llevar a cabo el ciclo completo de trabajo y, en la medida de lo posible, este basado en herramientas libres, tanto a nivel *software* como a nivel *hardware*. De este modo, como se ha venido demostrando en el laboratorio donde se ha llevado a cabo el presente trabajo (ver [4] y [29]), se consigue un coste mas reducido a la hora de realizar los procesos, se obtienen mayores niveles de calidad, se reducen tiempos de procesado y se asegura un mayor grado de flexibilidad y adaptabilidad a la hora de emplear el sistema para tratar piezas que requieran añadir nuevos sistemas auxiliares o utilizarlos de modo diferente al habitual.

1.2. Objetivo

El objetivo de este trabajo es describir la metodologia necesaria para obtener una herramienta flexible que permita controlar de modo completo un sistema de tratamiento por laser. Dicha herramienta constara de una serie de elementos hardware auxiliares y un conjunto de modulos software que permitiran realizar las tareas de modo automatizado, sencillo y sin necesidad de intervencion por parte del operador, siendo posible monitorizar y controlar el proceso a medida que se lleva a cabo. Aunque la metodologia descrita puede ser empleada para diferentes procesos, se ha desarrollado una herramienta que permite controlar el proceso completo en el caso concreto de la tecnica de laser cladding en una celula robotizada. Adicionalmente, se han incluido, a modo de demostracion de la flexibilidad de la metodologia, ejemplos de casos de automatizacion parcial de algunas tareas de micromecanizado laser y soldadura hibrida laser-arco.

1.3. Alcance y limitaciones

El alcance de esta tesis es la descripcion de un metodo que permita la automatizacion completa de las etapas basicas de procesos industriales que utilizan el laser como herramienta, asi como evaluar, diseñar y/o controlar los sistemas necesarios para la correcta implementacion de dicho metodo. Los temas tratados son los siguientes:

- Obtencion de datos de diferentes sensores y combinado con uso y diseño de sistemas de control para procesos laser.
- Algoritmia para generacion de trayectorias en un espacio tridimensional empleando diversos sistemas de traslacion.
- Uso de profilometria para identificar de modo automatico superficies de trabajo.

- Conversion de nubes de puntos a volúmenes tridimensionales para generación automática de trayectorias.
- Diseño de estructura de datos y formato que permita automatización completa de un tratamiento láser
- Desarrollo del software y hardware modular para monitorización y control independiente de múltiples elementos
- Experimentos para validación de metodología, algoritmos y desarrollos

Se enumeran a continuación las principales restricciones que delimitan el alcance del presente trabajo

- Los algoritmos que permiten el desplazamiento a través de una trayectoria se han descrito en detalle únicamente para un único sistema de traslación, en concreto un robot de 6 grados de libertad.
- La metodología empleada para generar automáticamente las trayectorias funciona de modo consistente y es robusta para los procesos de láser cladding, pero podría dar lugar a resultados inestables o más imprecisos en procesos que requieran una muy alta velocidad de traslación debido fundamentalmente a las limitaciones físicas del hardware.
- El software desarrollado no pretende ser tan rápido e intuitivo como un producto profesional. Es sin embargo lo bastante útil y robusto como para probar que la aproximación al problema descrita en este trabajo es válida y servir como punto de arranque a otros desarrolladores.
- El objetivo de este trabajo es presentar una metodología general para automatizar procesos usando el láser como herramienta, aplicándola a un ejemplo concreto para su validación, en este caso un sistema robotizado de láser cladding, por ello no se han optimizado los parámetros en ninguno de los experimentos realizados, siendo su función validar el correcto funcionamiento de las nuevas capacidades del sistema, no generar resultados de alta calidad.

1.4. Principales contribuciones

Las cinco principales contribuciones de esta tesis son las siguientes:

- Se ha desarrollado una técnica de muestreo y análisis de datos que permite evaluar los resultados experimentales de varias técnicas de modo semiautomático, pudiendo determinar el nivel de calidad y valores cuantitativos que permiten determinar si se han superado los límites de defecto admisibles en una pieza en el mismo momento de su fabricación. Hace factible el almacenar los pasos intermedios del proceso de fabricación, obteniendo un historial de datos que ayuda a determinar la posición más probable de posibles defectos, dirección preferente de cortadura y/o desgaste, etc. Adicionalmente puede generarse una representación tridimensional de la pieza final con sus medidas reales.
- Se ha desarrollado un controlador de lazo cerrado PID Adaptativo de bajo coste basado en Open Hardware, incorporándolo a un sistema de procesamiento láser. Dicho controlador es fácilmente integrable en cualquier sistema, pudiendo ser controlado desde múltiples ubicaciones (sistema robotizado, ordenador, etc) y es altamente flexible, pudiendo ser utilizado para distintas técnicas y con diferentes sensores. Su uso permite generar resultados de

mejor calidad y con mayor repetibilidad. Adicionalmente, permite actuar como sistema de muestreo, tanto si el control PID esta activado o no.

- Se han descrito una serie de algoritmos que permiten programar y realizar desplazamientos automaticamente con un sistema robotizado a velocidad constante trazando curvas complejas, rellenar areas con diferentes patrones y mover una herramienta manteniendo su posicion normal a una superficie compleja, siendo dichos algoritmos adaptables a multiples sistemas de desplazamiento. Su uso e implementacion en una aplicacion posibilita realizar tratamientos con laser sobre piezas y superficies muy diversas a un usuario sin un conocimiento intrinseco del sistema de desplazamiento.
- Se ha descrito una metodologia que permite ahorrar tiempo de preparacion y procesado de piezas mediante tratamiento por laser, minimizando ademas errores humanos. Dicha metodologia ha sido probada mediante el diseño e implementacion de una herramienta que esta basada en el uso de un escaner laser para obtener la metrologia de la pieza a tratar, el uso de codigo propio y librerias de software libre para generar las trayectorias y establecer los parametros de funcionamiento de los distintos sistemas asociados, el uso de sistemas de hardware libre para controlar, integrar y activar elementos auxiliares y el uso de formatos libres, en concreto STL, para definir los volúmenes y/o superficies e interactuar a posteriori con ellos.
- Se ha implementado un sistema CAM completo, que interpreta programas escritos en un formato propio facilmente legible (basado en el lenguaje de etiquetas XML). Dicho formato integra elementos de trayectoria tridimensionales, parametros de trabajo y puede ser generado de modo automatico mediante la herramienta que se ha desarrollado. El software CAM se ha diseñado de modo que sea lo bastante flexible como para integrar robots, controles numericos y otros sistemas de desplazamiento, siempre y cuando se disponga del manual de comandos de los mismos, de modo sencillo y rapido. Adicionalmente, tambien es factible emplear el software CAM para distintas tecnicas basadas en el uso de una herramienta laser, tales como soldadura, corte o cladding, puesto que es igualmente flexible a la hora de integrar elementos auxiliares a controlar y nuevos parametros de trabajo. Todo ello se ha desarrollado empleando ademas software libre.

1.5. Estructura de la tesis

A continuacion se describira la forma en que se ha organizado el presente documento, asi como las causas que lo justifican.

1.5.1. Contexto

Es posible que el lector mas avanzado, despues de una primera lectura del documento, eche en falta explicaciones concretas de una u otra indole, en funcion de su formacion o area de interes. Es por ello importante reseñar que el presente texto pretende ser simplemente una guia basica que permita, apoyandose en el codigo desarrollado y en la documentacion de los elementos constituyentes de los distintos sistemas disponible en el laboratorio (hayan sido adquiridos o diseñados y fabricados especificamente para el desarrollo de este trabajo), mantener y mejorar el sistema actual disponible, asi como replicarlo y poder adaptarlo a nuevos procesos y sistemas en caso de necesidad. Esto es asi porque es dificil entender en su extension el trabajo global sin analizar igualmente los elementos de implementacion del mismo y el grado de integracion obtenido, cosa harto dificil a partir de un unico documento, ya que se trata de un proceso de mejora continua basado en la deteccion de necesidades, realizacion de ensayos, generalizacion de

soluciones e implementacion de algoritmos de modo dinamico, combinando software, hardware, firmware, matematicas y fisica.

Por lo tanto, en base a lo comentado, continuando con el espiritu de este trabajo, que como se ha explicado mas arriba es el desarrollo de metodos y herramientas para minimizar tiempos y maximizar rendimientos, se ha intentado limitar la extension de los capitulos al minimo imprescindible para que sean utiles desde un punto de vista practico, pero no por ello se han omitido las explicaciones que se consideran indispensables para comprender los problemas detectados y las soluciones empleadas o propuestas para su resolucion.

Finalmente, antes de exponer la estructura basica del texto, indicar el hecho de que, aunque quizas no sea una tesis al uso, se trata de un trabajo llevado a cabo por el autor en base a necesidades reales de la industria y laboratorios de fisica experimental orientados a la resolucion de problemas de la industria, que ha dado lugar a produccion cientifica y ha facilitado el poder ejecutar experimentos que de otro modo no hubiesen sido posibles. En opinion del autor, este trabajo se trata, en esencia, de un ejemplo de lo que representa y significa la propia Ingeniería Industrial, ambito en que se ha de enmarcar el mismo.

1.5.2. Esquema general

El presente trabajo esta subdividido en nueve capitulos, que se ennumeran a continuacion junto con un breve resumen de su contenido.

1. Introduccion: En dicho capitulo se describe de modo resumido el ambito de uso de los resultados de este trabajo, identificando la problematica a resolver, indicando las limitaciones de la solucion propuesta y se describen las contribuciones del trabajo que se consideran lo bastante innovadoras como para hacer merecedor al autor de alcanzar el grado de doctor.
2. Montaje experimental: Se describiran los elementos que se han empleado para comprobar que las soluciones teoricas propuestas funcionan de modo practico. A pesar de lo breve de su extension, es de especial importancia este capitulo en un trabajo de estas caracteristicas, debido a que son a la vez las herramientas experimentales, el objetivo y parte del origen del problema que se pretende resolver.
3. Generacion de trayectorias: Se describe la metodologia y base matematica necesarias para generar de modo automatizado una serie limitada de tipos de trayectorias que se puedan recorrer con una herramienta en el espacio, manteniendo la velocidad constante. Se particulariza la solucion para el caso concreto de un robot industrial de seis grados de libertad. Tambien se describe un formato de almacenamiento generico que permite definir las trayectorias de modo sencillo para multiples sistemas de desplazamiento.
4. Muestreo de datos y sistema de control: Se describe muy brevemente la tipologia del modelo de adquisicion de datos y de sistema de control empleados en los casos descritos.
5. Obtención de modelos de superficies: Se describe la metodologia y base matematica necesarias para generar de modo automatizado un conjunto de nubes de puntos que definen una superficie a partir de los datos obtenidos de una herramienta de medicion. Se usa como ejemplo un profilometro laser bidimensional
6. Metodos para procesamiento laser usando modelos de superficies y volúmenes: Se describe la metodologia y base matematica necesarias para emplear nubes de puntos como base para la generacion directa de trayectorias de modo automatico, de modo que la herramienta pueda desplazarse sobre la superficie segun la orientacion de la misma. Igualmente se

describen la metodologia y base matematica necesarias para efectuar la conversion de las nubes de puntos en mallas poligonales, combinarlas con otras de formas diversas y realizar tareas de procesamiento mediante herramientas laser, utilizando la generacion de trayectorias de modo automatico para capas sucesivas.

7. Resultados experimentales: Se muestran varios ejemplos que permiten ilustrar los procesos descritos previamente y demostrar las capacidades del sistema
8. Conclusiones y Trabajos futuros: Se analizan los resultados obtenidos y se valora el grado de exito en relacion al objetivo inicial. Se indican las mejoras pendientes, indicando alternativas y metodos posibles para su consecucion.

En relacion a las referencias bibliograficas, se ha optado por mantener los formatos originales de las mismas tal y como las ofrecen las propias fuentes, y, en lugar de incluirlas de modo independiente en una seccion dedicada a analizar el estado del arte, debido a los multiples bloques que forman el presente trabajo, se han incorporado directamente en el texto, a fin de mejorar el entendimiento del problema o la solucion concreta discutidos.

Adicionalmente se ha incluido un resumen documental o *abstract*, un pequeño glosario de abreviaturas y un indice para facilitar la lectura del texto al lector.

Capítulo 2

Montaje experimental

A lo largo del presente capítulo se describirán los principales elementos *hardware* reales, que se pueden encontrar en laboratorios y plantas industriales, empleados para realizar pruebas experimentales que permitan validar la metodología que se describe en el presente trabajo. Se describen tres casos en los que se ha aplicado, en mayor o menor medida, la metodología que se propone: un montaje para laser cladding, un montaje para micromecanizado laser y un montaje para montaje para soldadura híbrida laser-arco.

Como ya se ha indicado, se ha observado que la integración de los elementos necesarios para llevar a cabo tratamientos laser resulta compleja porque, en muchas ocasiones, no están diseñados para ello y tienen métodos de comunicación heterogéneos, o bien, en algunos casos carecen de ellos. Esto es un hecho a tener en cuenta porque es una situación frecuente en un entorno real, que requiere la inversión de muchas horas de trabajo y causa importantes retrasos durante la fase de implantación de este tipo de sistemas. Adicionalmente, la operativa de este tipo de sistemas normalmente implica el uso de diversas herramientas de *software* o aplicaciones de control cuya interacción puede no estar prevista y ser, en algunos casos, necesaria. Considerando lo anterior, nos encontramos con un escenario en el que se requiere una gran cantidad de esfuerzo y formación para obtener solamente una capacidad operativa limitada y restringida por las capacidades originales de los elementos que componen el sistema.

Debido a la complejidad inherente a este tipo de sistemas, se ha considerado adecuado proponer una metodología alternativa y escalable que haga posible una reducción de tiempos de implantación y operativa, así como que mejore la usabilidad de sistema. Para ello, ha de tenerse en cuenta que dicha metodología debe facilitar la incorporación de nuevos elementos *hardware* al sistema, así como conseguir un sistema lo suficientemente flexible que permita llevar a cabo múltiples tareas sin apenas modificaciones. Adicionalmente, es necesario emplear un método de comunicación robusto, que permita el manejo de todos los elementos del sistema de modo sencillo y transparente. En algunos casos, debido a la propia naturaleza de los sistemas, aquellos que realizan tareas en tiempo real pueden tener diferentes restricciones que obliguen a emplear métodos alternativos a los propuestos de modo general.

A continuación se describe un esquema del sistema global, que permite ilustrar una configuración genérica en la cual se pueden incluir los diferentes sistemas necesarios para llevar a cabo tratamientos laser.

- Sistema de traslación: Una parte importante de este trabajo está relacionada con el recorrido de trayectorias en el espacio, esto es, llegar a alcanzar un conjunto de puntos sucesivos con cierta orientación y manteniendo una velocidad constante. En cada caso, el método para llevar a cabo estos movimientos vendrá determinado por el tipo de sistema de traslación, sus limitaciones físicas y los comandos de movimiento disponibles.
- Sistema para tratamiento con laser: El láser es una herramienta muy versátil, pero cada tarea tiene sus requerimientos. Densidad de potencia, efecto térmico o ablación, longitud

de onda, perfil del haz y otros parámetros deben fijarse en función del proceso a realizar, para poder seleccionar el láser correcto que permita llevarlo a cabo de la manera adecuada. A pesar de esto, todo el equipamiento láser descrito en el presente trabajo es lo bastante flexible como para efectuar tratamientos diferentes a los descritos con una eficiencia razonable y sin tener que efectuar cambios importantes en el montaje. La descripción de los sistemas láser de los diferentes montajes no es exhaustiva y se ha incluido únicamente para indicar el modo en que se produce la interacción entre este tipo de equipos y el resto de elementos *hardware*.

- **Sensores ópticos:** Debido a la especial naturaleza de los tratamientos láser, con frecuencia se opta por sensores sin contacto, a fin de evitar el desgaste acelerado, así como otros problemas relacionados con las altas temperaturas que se alcanzan en las superficies tratadas con esta herramienta. Normalmente se emplean sistemas ópticos debido a su elevada disponibilidad y porque pueden ser utilizados para obtener una gran cantidad de datos relacionados con el estado del proceso y la evolución del mismo. Independientemente del tipo de sensor, es conveniente apantallarlos para evitar los posibles daños que pudieran derivarse debido a los posibles reflejos. Esto es aún más importante en el caso de aquellos que son de tipo óptico, porque la luz láser, en el peor de los casos puede saturar el sensor, o introducir errores y/o ruido en la señal. El uso de filtros dicróicos para evitar el paso de la longitud de onda del láser empleado y de filtros de densidad neutra para reducir el impacto de los picos de intensidad que se producen durante el proceso, es una técnica habitual que se aplica cuando es necesario.
- **Sistemas auxiliares:** Casi todos los procesos industriales que utilizan el láser como herramienta requieren un importante número de sistemas generales de apoyo o auxiliares; las válvulas que controlan el flujo de gas de protección, los enfriadores del sistema láser o los circuitos de parada de emergencia son algunos ejemplos de este tipo de elementos. Sin embargo, hay otros relacionados específicamente con cada proceso que son esenciales para hacerlo posible y tienen que interactuar con el resto del *hardware* de manera más compleja. Se describirán en cada caso solo los más importantes de estos últimos, sobre todo si son parametrizables y tienen un impacto importante en el resultado final.

En todos los casos descritos, salvo que se indique lo contrario, se considera que se empleará un ordenador convencional, con interfaz USB, serie y ethernet, siendo este el sistema empleado por el usuario para controlar el sistema de manera global, salvar y analizar los datos obtenidos de los sensores, generar los programas de proceso, comunicarse con los distintos elementos que componen el montaje e iniciar los tratamientos.

Las tres configuraciones que se han mencionado previamente, con sus respectivos sistemas, se describirán con más detalle a lo largo del capítulo. Cada una de ellas se ha empleado para evaluar, en mayor o menor medida, los métodos propuestos para obtener procesos de tratamiento láser más automatizados, pero el alcance y la etapa o etapas del proceso será diferente para cada configuración. Teniendo esto en cuenta, aparte de una breve descripción genérica de los sistemas para explicar su función dentro del montaje, se incluirá la información básica necesaria para integrar los sistemas empleando la metodología descrita.

La primera de ellas permite llevar a cabo procesos de láser cladding, estando las tareas de automatización relacionadas con la generación de trayectorias tridimensionales, adquisición de datos y sistemas de control. La segunda de ellas permite llevar a cabo procesos de micromecanizado, estando las tareas de automatización relacionadas con trayectorias bidimensionales que pueden incluir curvas complejas. La tercera de ellas permite llevar a cabo procesos de soldadura híbrida láser-arco estando las tareas de automatización relacionadas con la adquisición de datos.

2.1. Prerrequisitos

Como se ha mencionado previamente, el objetivo sera la obtencion de un sistema facil de mantener y utilizar, parametrizable, que tenga la posibilidad de añadir elementos nuevos de modo sencillo y que haga posible alcanzar resultados de elevada calidad. Para garantizar estas características, es necesario definir una serie de prerrequisitos que cada elemento *hardware* del sistema debe cumplir, en mayor o menor grado, en funcion del funcionamiento y funcionalidad del mismo:

- **Precisión:** Para alcanzar el grado de calidad deseado cada elemento *hardware* debe tener suficiente precisión y velocidad/latencia como para llevar a cabo el tratamiento por laser. Como cada procesado realizado con laser es diferente, los valores seran diversos y se detallaran para cada uno de los casos particulares analizados a lo largo del presente capitulo.
- **Flexibilidad:** Cada elemento *hardware* debe tener la opcion de trabajar de modo independiente, es decir, sin que sea necesaria la presencia de otros elementos concretos para que puedan funcionar, y de ser manejado externamente, p.e. alterando sus parametros o activandolo/desactivandolo, mediante una serie de comandos o E/S. Esto hace posible la combinacion de elementos de modo sencillo para conseguir diferentes resultados o incluso nuevas configuraciones de trabajo. Como ventaja añadida, esto permitiria incrementar la utilidad de los equipos, pudiendo alterar incluso la funcionalidad asociada a los mismos y permitiendoles realizar en algunos casos otras tareas para las que no estaban previstos.
- **Facilmente mantenible:** Tanto los elementos contruidos *ad hoc* como los cambios y sistemas auxiliares introducidos en los elementos modificados se han diseñado de modo que sea sencillo encontrar piezas y/o componentes, evitando la complejidad, basandose en una estructura modular y facilitando la sustitucion de los mismos en caso de averia. Es necesario que los documentos relativos al protocolo de comunicacion, los comandos existentes, listado de repuestos y manuales de usuario existan y esten disponibles. Siempre que sea posible, se utilizaran de modo preferente los sistemas OSHW, o bien sistemas transparentes con SDK multiplataforma FLOSS en su defecto.
- **Facilidad de uso:** Aunque este prerrequisito pueda estar mas relacionado con la parte *software* del sistema completo, tambien debe ser tenido en cuenta en lo que se refiere a los elementos *hardware* que lo componen. Cada elemento, particularmente aquellos que en alguna ocasion deban ser controlados directamente por el usuario, como los sistemas de traslacion, deben incorporar una interfaz adecuada que permita visualizar y/o modificar los parametros esenciales o con mayor impacto en el proceso. Esto permitira evitar que usuarios con poca experiencia en el uso del *hardware* pero con un profundo conocimiento del tratamiento laser a realizar se vean obstaculizados a la hora de llevar a cabo dicho tratamiento debido a problemas no intrinsecamente relacionados con el mismo.
- **Conectividad:** Se empleara una red de comunicaciones tipo TCP/IP para conseguir un conjunto de elementos que puedan trabajar al mismo tiempo e interaccionando entre si. Por esta razon, siempre que sea posible, se dotara a aquellos equipos que no soporten este tipo de sistema de comunicaciones del *hardware* auxiliar necesario para permitir su incorporacion a la red. Este esquema de trabajo, basado en una red ethernet convencional, permite el uso de un estandar de red bien documentado, transparente, ampliamente extendido, ademas de ser facil conectar al sistema cualquier ordenador convencional, siendo necesaria unicamente una tarjeta de red generica y el empleo de sockets, disponibles en la practica totalidad de lenguajes de alto nivel.

La figura 2.1 muestra un sistema ideal, con varios elementos interconectados empleando la red TCP/IP descrita y mediante conexiones de tiempo real, que pueden ser necesarias o no, dependiendo de los requisitos del tratamiento laser.

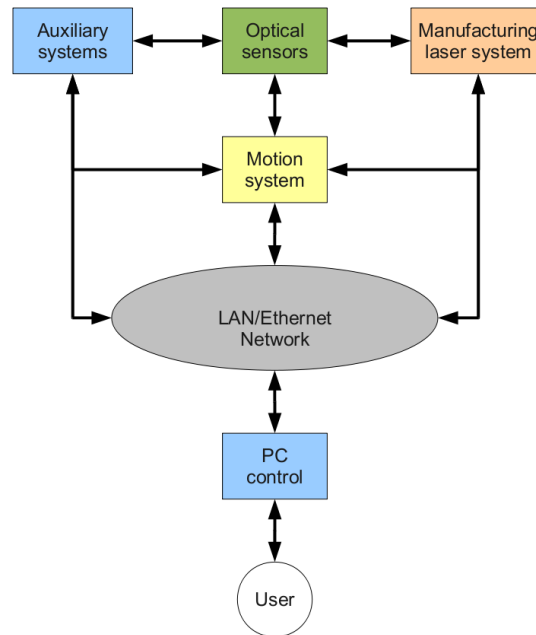


Figura 2.1: Diagrama que muestra montaje ideal para llevar a cabo tratamientos laser

Si uno o mas prerequisites no se cumplen, el sistema podra trabajar adecuadamente y llevar a cabo correctamente las tareas para las que haya sido diseñado pero reduce en gran medida las potenciales ventajas derivadas de emplear la metodologia que se describe en el presente trabajo. El cumplimiento de ciertos prerequisites es mas importante que el cumplimiento de otros en relacion al incremento de capacidades del sistema. Los dos prerequisites criticos son los dos primeros, la precision, porque generalmente es muy complicado o directamente imposible modificar este valor en la mayor parte de elementos *hardware*, y la flexibilidad, porque generalmente es una condicion necesaria para automatizar el proceso y en gran parte de los casos se requieren importantes y complejas modificaciones para llegar a incorporar un sistema que permita el control de un elemento *hardware* si este no disponia del mismo inicialmente. El no cumplimiento del resto de prerequisites supone un obstaculo, pero generalmente puede ser solucionarse o reducir su impacto de modo sencillo empleando *software* y/o elementos *hardware* diseñados especificamente para cada caso concreto.

A continuacion, cada uno de los montajes experimentales se describira empleando el esquema general descrito y particularizandolo para cada caso.

2.2. Montaje para cladding

2.2.1. Laser cladding

El laser cladding es una técnica de reparación y fabricación aditiva que proyecta polvo fundido por un haz láser sobre la pieza a tratar. Para ello la herramienta con el cabezal láser debe situarse a una distancia y con una orientación adecuadas respecto a la geometría de la pieza original. Aun en los casos más sencillos la programación de la trayectoria a seguir por la

herramienta es compleja y origina situaciones que no pueden resolverse de un medio sencillo con las técnicas de introducción manual de elementos tipo punto, línea o arco, ya que este método no garantiza una precisión suficiente en los recorridos de la herramienta que produce una baja eficiencia del proceso. Adicionalmente el proceso de laser cladding requiere que las trayectorias sean recorridas a velocidad constante con el fin de garantizar un recubrimiento lo más uniforme posible. Para evitar estos problemas y poder hacerlo más eficiente en tiempo y coste.

2.2.2. Descripción global

El conjunto de sistemas que se describe a continuación permiten llevar a cabo procesos de laser cladding. Es el montaje más automatizado de los tres descritos en el presente trabajo y consta de al menos un elemento de cada uno de los tipos de sistema descritos en el esquema general del caso ideal. Todos los elementos funcionan simultáneamente y cada etapa del proceso se lleva a cabo hasta su finalización, antes de que comience la siguiente de modo automático. Todos los elementos están conectados a una red TCP/IP o son sistemas esclavos controlados por otro sistema que si está conectado a dicha red.

- El sistema de traslación está basado en un brazo robótico y un posicionador rotativo, que permiten desplazar la herramienta para tratamiento laser y/o el escaner laser de medición de superficies acoplados en la muñeca del robot con el ángulo y velocidad deseados a lo largo de una trayectoria previamente calculada, normalmente sobre una pieza colocada en la posición adecuada empleando el posicionador rotativo. El cordón que se obtendrá en los tratamientos de laser cladding que está previsto realizar la precisión requerida es del orden de ± 0.5 mm to 1.0 mm. Este tipo de solución, basada en un sistema robotizado, es notablemente más flexible que un CNC convencional cuando es necesario procesar geometrías muy grandes o complejas. El controlador del sistema de traslación se puede programar para llevar a cabo los desplazamientos mediante un ordenador convencional y el *software* CAM desarrollado a partir de la metodología descrita en el presente trabajo.
- El sistema para tratamiento con laser se ha seleccionado teniendo en cuenta que se trata de un equipo laser continuo que trabaja en el infrarrojo, lo que lo hace adecuado para llevar a cabo procesos basados en efectos térmicos, como el laser cladding. El haz se envía a través de una fibra, lo que aumenta la flexibilidad del sistema a la hora de posicionar la herramienta. La potencia de salida puede variarse en tiempo real modificando un valor analógico de entrada.
- Una parte de los sensores ópticos seleccionados, a saber, un fotodiodo IR, la cámara CMOS y un pirometro, están adosados a la herramienta laser y se utilizarán mientras se lleva a cabo el tratamiento. Se han diseñado o se han modificado de modo tal que sea posible efectuar medidas de la zona que está siendo procesada mientras el laser está emitiendo. El tamaño del área y la resolución con que es posible medir dicha área depende de la distancia de los sensores a la misma. La frecuencia de muestreo requerida para obtener datos representativos o emplear señales como realimentación de un sistema de control de proceso es del orden de 100 Hz para el fotodiodo IR y el pirometro o 100 fps para la cámara CMOS, encontrándose dicho valor por debajo del límite máximo de los diferentes sensores.

El otro sensor óptico seleccionado, el escaner laser, se empleará en los periodos previos y posteriores al tratamiento y se encuentra, como ya se ha mencionado, al igual que la herramienta, adosado a la muñeca del robot. Esto permite aprovechar la flexibilidad del brazo robótico y evita incluir un sistema de traslación adicional para efectuar las medidas. El uso de esta herramienta de medida junto con este sistema de traslación permite obtener una precisión del orden de ± 0.35 mm, que resulta suficiente para este tipo de proceso.

- Los equipos auxiliares están conectados a otros elementos del sistema. El distribuidor de polvo se encuentra conectado al controlador del robot, pudiendo este último ser usado para activarlo, desactivarlo y establecer el flujo de salida de las tolvas. El sistema de sincronización y automatización inicia los programas almacenados en el controlador del robot y el escaneo láser. La tarjeta de adquisición de datos se encuentra conectada a parte de los sensores ópticos, pudiendo utilizarse para almacenar las señales obtenidas de dichos sensores, se empleará además como *trigger* para iniciar el proceso de obtención de imágenes de la cámara CMOS y sistema de control, pero depende de un ordenador dedicado para poder llevar a cabo dichas tareas. El sistema autónomo de adquisición de datos y control, que permite sustituir la tarjeta de adquisición de datos y ampliar las opciones del sistema de control, funciona sin necesidad de elementos adicionales.

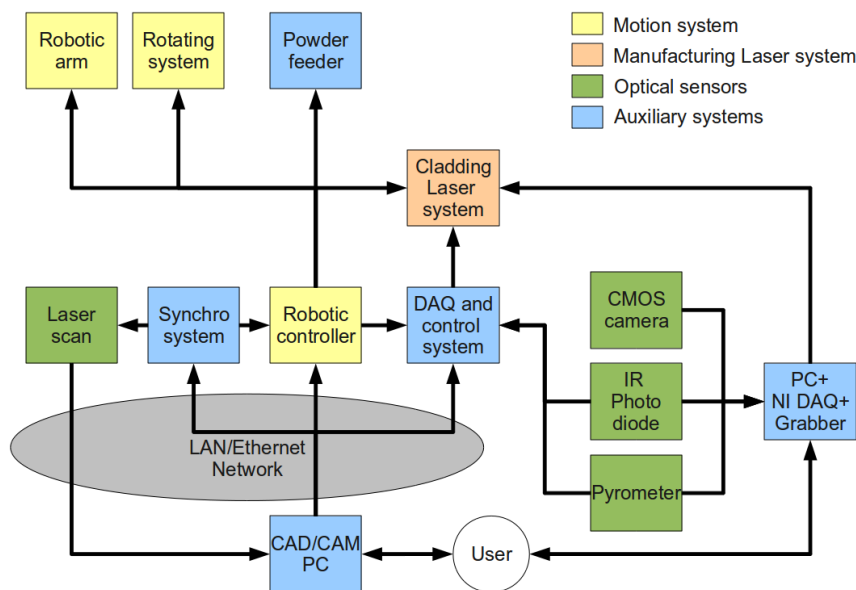


Figura 2.2: Diagrama que muestra montaje que permite llevar a cabo procesos de laser cladding

El sistema que permite llevar a cabo procesos de laser cladding se ha diseñado de modo que existan diferentes modos de operación. Dichos modos de operación se describen a continuación:

- Modo libre o experimental: Permite llevar a cabo experimentos efectuando trayectorias introducidas por el usuario de modo manual y con los parámetros que este seleccione. Se puede utilizar un control de lazo abierto o de lazo cerrado para llevar a cabo los procesos. El usuario tiene la opción de muestrear y salvar los datos de los diferentes sensores ópticos que monitorizan el proceso mientras este se lleva a cabo, con las limitaciones de memoria asociadas a cada uno de ellos.
 - Si el usuario decide almacenar los datos de los sensores ópticos, deberá poner en marcha un módulo *software* específico diseñado para llevar a cabo dicha tarea. El proceso de muestreo y almacenamiento no comenzará hasta que se active la herramienta láser, terminando cuando se le haya indicado, ya sea al apagarse la herramienta láser o después de un periodo de tiempo fijo, cuando se alcance el límite de memoria de almacenamiento disponible para cada uno de los sensores o cuando se pare la aplicación.

- El usuario utilizara el *software* CAM para definir los parametros del tratamiento laser. En el caso del laser cladding, dichos parametros seran los que definen los elementos de la trayectoria (la union de los puntos, lineas, arcos y curvas complejas que den origen a un desplazamiento), directamente relacionados con la distancia de la herramienta a la pieza, velocidad de desplazamiento, angulo de la herramienta, flujo de polvo y potencia de salida del laser, en el caso de trabajar en lazo abierto, o valor de consigna y parametros de control, en el caso de trabajar en lazo cerrado.
 - Los parametros descritos por el usuario se convierten a comandos del sistema de traslacion, en este caso el robot, y se almacena en el controlador del mismo, en este caso mediante un servidor FTP, todo ello de modo automatico y transparente. Una vez finalizado el proceso de subida y validacion, se ejecuta el programa, seleccionandolo y activando el controlador del sistema de traslacion mediante el sistema de sincronizacion y automatizacion, que a su vez estara controlado por el *software* CAM.
 - El controlador del sistema de traslacion enviara un señal indicando si el proceso esta activo o ya ha finalizado al sistema de sincronizacion y automatizacion, realizara el proceso de encendido y apagado del laser, activara y desactivara el haz del mismo en las posiciones indicadas, se encargara del manejo del distribuidor de polvo, indicara al sistema de traslacion donde y con que velocidad mover la herramienta y manejara la potencia de salida del laser, o bien establecera el valor de consigna para el sistema de control.
- Modo de escaneo laser o de medición de superficies: El usuario tiene la opcion de obtener la medida de la posicion actual de la herramienta de modo dinamico, o bien obtener una nube de puntos asociada a una superficie real, en general de la pieza que se pretende tratar, y almacenar dichos valores. En este ultimo caso, dicha nube podra ser utilizada para generar automaticamente nuevas trayectorias.
- En caso de que el usuario decida obtener una nube de puntos, utilizara el *software* CAM para definir los parametros del escaneo laser. En el caso del montaje descrito, dichos parametros seran la ruta de almacenamiento de la nube de puntos, las coordenadas que definen los limites maximos y minimos del area a escanear en el plano XY, la altura z a la que se realizara el proceso, el grado de solape entre barridos del sistema a fin de cubrir el area seleccionada por completo, la velocidad de la herramienta, asi como la direccion y sentido del recorrido de la misma.
 - Los parametros descritos por el usuario se convierten a comandos del sistema de traslacion, en este caso el robot, y se almacena en el controlador del mismo, en este caso mediante un servidor FTP, todo ello de modo automatico y transparente. Una vez finalizado el proceso de subida y validacion, se ejecuta el programa, seleccionandolo y activando el controlador del sistema de traslacion mediante el sistema de sincronizacion y automatizacion, que a su vez estara controlado por el *software* CAM.
 - El controlador del sistema de traslacion enviara un señal indicando si el proceso esta activo o ya ha finalizado al sistema de sincronizacion y automatizacion, indicara al sistema de traslacion donde y con que velocidad mover la herramienta y manejara la potencia de salida del laser. Por otra parte, el sistema de sincronizacion y automatizacion puede actuar como *trigger* del escaner laser.
- Modo de fabricacion de geometrias mediante DMD o de produccion: Permite llevar a cabo el recubrimiento de superficies o acumular diferentes capas de modo aditivo, partiendo de

un modelo digital y/o una superficie real medida mediante diversos medios, entre ellos, el propio escaner laser instalado en el sistema. Las trayectorias se generaran de modo automatico, a partir de los parametros indicados por el usuario. Se puede utilizar un control de lazo abierto o de lazo cerrado para llevar a cabo los procesos. El usuario tiene la opcion de muestrear y salvar los datos de los diferentes sensores opticos que monitorizan el proceso mientras este se lleva a cabo, con las limitaciones de memoria asociadas a cada uno ellos.

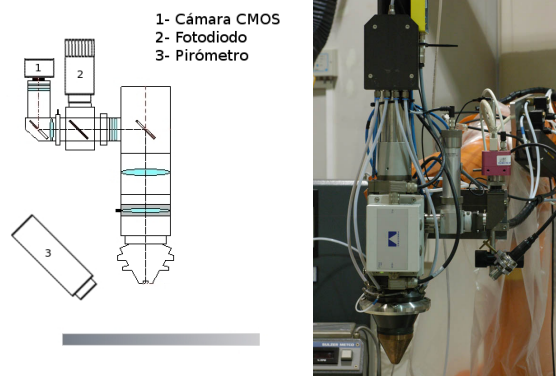


Figura 2.3: Montaje de sensores opticos para medidas *online*

Los pasos son equivalentes a los descritos para el modo experimental, con la diferencia de que los parametros indicados por el usuario seran aquellos que permitan definir, de modo univoco, las capas aditivas o de recubrimiento.

2.2.3. Brazo robotico, sistema de rotacion y controlador

El brazo robotico es un ABB IRB2400/16 de 6 DoF con una repetibilidad de ± 0.06 mm y precision de ± 0.2 mm. El eje 6 no tiene limite fisico de giro y el eje 4 ha sido modificado para eliminar la restriccion del mismo, permitiendo la rotacion ilimitada en ambos ejes. El robot puede sostener un maximo de 16 kg en la muñeca. La maxima velocidad de rotacion de los ejes de posicionamiento 1,2 y 3 es de 150°s^{-1} , para los ejes de reorientacion 4 y 5 es 360°s^{-1} para el 6 es 450°s^{-1} .

El sistema de rotacion es un ABB IRBP A-500 de 2 DoF con una capacidad de carga de 500 kg, un par continuo maximo de 650 Nm, repetibilidad de ± 0.05 mm. La velocidad maxima de rotacion del eje 1 es 90°s^{-1} y para el eje 2 es 150°s^{-1} .

El controlador es un ABB IRC5 con E/S digitales y analogicas que se emplearan para controlar el laser y otros sistemas auxiliares. Este sistema tiene instalado un RTOS que permite calcular las diferentes posiciones a alcanzar por el sistema de traslacion, controlar los servos del sistema robotizado, evaluar o modificar los valores de las E/S e interactuar con el usuario. El equipo posee un interprete de codigo RAPID que puede validar y ejecutar programas escritos en este lenguaje de programacion.

La comunicacion con este conjunto de elementos se llevara a cabo a traves de una conexion ethernet con paquetes TCP/IP, empleando un grupo de comandos que se detallan en el manual correspondientes y es posible almacenar programas a la memoria interna del controlador empleando para ello un servidor FTP, asi como establecer conexiones e intercambiar informacion de proceso con otros nodos de la red usando sockets.



Figura 2.4: Conjunto de elementos que conforman el sistema de traslacion

2.2.4. Sistema laser para cladding

El sistema laser para cladding es un Rofin Sinar DY022 Nd:YAG bombeado con diodos que emite en la longitud de onda de 1064 nm, con 4 cavidades, una potencia maxima de salida de 2200 W y calidad de haz nominal de 12 mm mrad. Cuando el sistema esta configurado en modo automatico, es posible modificar el valor de potencia de salida mediante una se~al analogica externa.



Figura 2.5: Laser Rofin Sinar DY022 Nd:YAG

Se puede conocer el estado del sistema y las distintas alarmas del mismo, asi como controlar la activacion del haz laser, los programas cargados en el laser y la seleccion de la fibra utilizada, utilizando E/S digitales externas.

2.2.5. Fotodiodo IR

Este sensor optico permite medir la luz emitida durante un tratamiento laser. En el caso concreto del laser cladding, la luz emitida esta relacionada con el ancho del cordon y la calidad final del mismo.

El fotodiodo es un Precitec SD LWM DTI-Y100-E tipo T-detector fabricado con germanio, sensible en el rango del infrarrojo (longitud de onda de 1400 nm to 1600 nm).

El sensor esta montado en un tubo metalico, con un filtro colocado en el camino optico, que evita el paso de la longitud de onda de la herramienta laser, asi como una lente que permite ajustar el tamaño del area a medir. A fin de reducir la intensidad de la luz que alcanza el fotodiodo, es posible incorporar diferentes filtros y mascarar en este tubo.

El equipo ha sido diseñado para ser utilizado con un sistema de control *online* Precitec, pero se ha realizado un proceso de ingenieria inversa para usarlo de modo independiente. La se~al que procede del sensor debe ser amplificada, debido a que su valor es demasiado pequeño

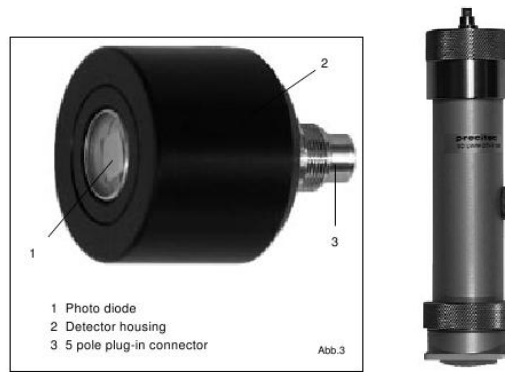


Figura 2.6: Fotodiodo y tubo de montaje

(del orden de 1 mV) para ser empleado directamente con el sistema de control. Se ha empleado un amplificador Precitec ASLR con un rango de $\times 100 - \times 1000000$, permitiendo que la señal alcance un valor de 0 V a 10 V. Es importante seleccionar el multiplicador de amplificación adecuado para cada caso, de forma que no se alcance el nivel de saturación del sensor, puesto que el valor de la señal varía mucho debido a los materiales empleados en el tratamiento, la absorción, ángulo de la herramienta, etc. Dicho amplificador está conectado a la tarjeta de adquisición de datos y/o al sistema autónomo de adquisición de datos y control.

2.2.6. Cámara CMOS

Este sensor óptico se empleará para obtener imágenes del proceso durante un tratamiento de laser cladding. El equipo permite estimar la HAZ, evaluar la distancia de la herramienta sobre la superficie tratada y medir el ancho del cordón.

La cámara CMOS es una Photonfocus MVD1024-28-CL-10 conectada a un *framegrabber* Dalsa-Coreco X64-CL que solo puede ser manejado mediante una librería de *software* cerrado. La cámara tiene una resolución máxima de 1024×1024 píxeles, una profundidad de color máxima de 10 bits, sensor monocromo sensible en el rango del visible (longitud de onda de 350 nm to 1000 nm) con una frecuencia de muestreo de 28 fps a máxima resolución, aunque es posible reducir el área de lectura para incrementar el número máximo de cuadros por segundo. El CMOS tiene una opción que permite modificar la respuesta del sensor de lineal a logarítmica y evitar las zonas sobreexpuestas o con sombras debido a la gran cantidad de luz producida durante el tratamiento. Se ha observado que durante el proceso de laser cladding, empleando el montaje actual, y centrando el sensor en la zona donde se funde el polvo, es posible emplear una ROI lo bastante pequeña como para obtener una frecuencia de muestreo máxima de 500 fps. La cámara usa el protocolo CameraLink para enviar y recibir información. Este protocolo es un estándar comercial que no puede ser leído sin un *framegrabber* o un sistema equivalente, diseñado de modo que permita convertir las señales y almacenar los datos de la imagen.

El *framegrabber* Dalsa-Coreco X64-CL es una tarjeta PCI card que ha sido instalada en un ordenador dedicado para que funcione de modo correcto. Este sistema permite cambiar los parámetros de la cámara y almacenar las imágenes en un formato que facilita su manipulación (en este caso formato GIF). El máximo número de imágenes que es posible almacenar depende del tamaño de las mismas, así como de la cantidad de memoria disponible en el ordenador y en el propio *framegrabber*. Es importante indicar que, para garantizar una frecuencia de muestreo constante durante la adquisición de imágenes, es necesario fijar previamente el número de imágenes total que se van a almacenar y configurar el *hardware* del *framegrabber* para llevar a cabo gran parte del proceso. Para realizar estas tareas, es necesario utilizar un SDK de código

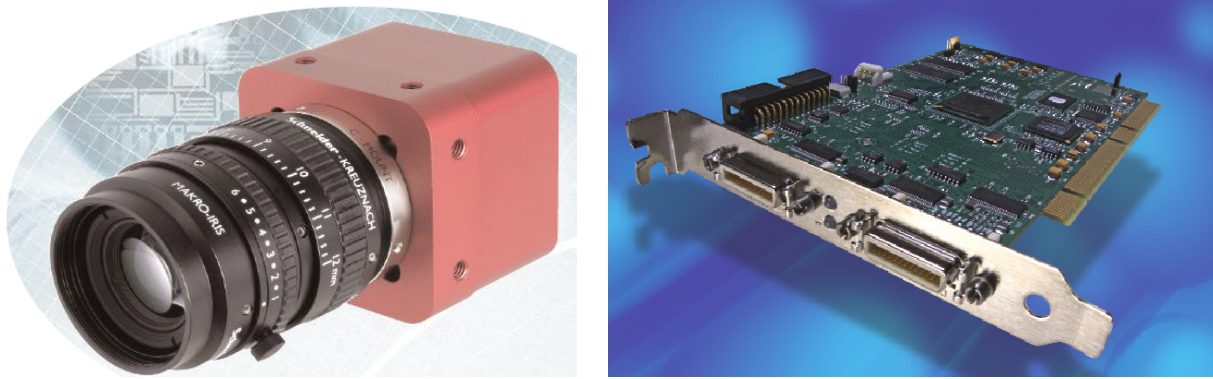


Figura 2.7: Camara CMOS y *framegrabber*

cerrado llamado Sopera LT.

Aunque es teóricamente posible utilizar la cámara para controlar el proceso empleando un módulo de *software* desarrollado para el almacenamiento y tratamiento de imágenes, se han observado problemas de sincronización debido al cuello de botella que suponen los tiempos de respuesta aleatorios del OS, al no ser este un RTC. Este problema puede ser resuelto empleando un RTOS que sea compatible con el SDK o diseñando un sistema hardware que permita leer y analizar los datos enviados por la cámara en tiempo real sin necesidad de utilizar *software* cerrado. Los parámetros de la cámara pueden ser modificados empleando el SDK, o enviando comandos a través del bus CameraLink.

2.2.7. Pirometro

Este sensor óptico se empleará para obtener los valores de temperatura del cordón de cladding mientras se está produciendo su solidificación. Las medidas se obtendrán a partir de la intensidad de ciertas longitudes de onda de la luz emitida durante el proceso.

El pirometro es un IMPAC IGAR 12-LO. Es un sistema digital con capacidad de detección en dos colores y sonda con fibra óptica, que permite medir la temperatura sin contacto. Las dos longitudes de onda empleadas para calcular la temperatura serán 1520 nm y 1640 nm, seleccionadas por estar lo bastante alejadas de la longitud de onda del láser que permite llevar a cabo el tratamiento, a fin de evitar el posible ruido en las medidas ocasionado por la luz emitida por el láser. El rango de medidas va de 550 °C a 2500 °C.

Los distintos parámetros del sistema pueden ser configurados mediante un conjunto de comandos, detallados en el manual correspondiente, y transmitidos a través de un puerto serie. El valor de temperatura puede obtenerse a partir de una salida analógica, que varía entre 0 V y 10 V, o como un valor digital a través de la conexión serie. El cabezal óptico unido a la fibra, que actúa como sonda de medida, incorpora un filtro adecuado para bloquear totalmente la longitud de onda del láser de tratamiento, así como un puntero láser, que permite determinar en qué punto estará midiéndose la temperatura.

Aunque no se ha empleado para llevar a cabo ningún experimento descrito en el presente trabajo, se ha incluido para mostrar el grado de flexibilidad alcanzado, ya que puede ser utilizado del mismo modo que el fotodiodo IR, sin necesidad de cambios de ningún tipo.

2.2.8. Escaner láser

Este sensor óptico se empleará para obtener medidas del ancho y alto del cordón de cladding una vez finalizado el proceso. También se empleará para obtener una nube de puntos 3D que



Figura 2.8: Pirometro IMPAC IGAR 12-LO

representa la superficie de trabajo y las modificaciones en ella realizadas. Las medidas obtenidas pueden ser utilizadas para recalcular los parámetros de los procesos posteriores, si existiesen, y afectasen a una zona previamente escaneada.

El escaner laser es un MEL M2DW 75/30 con un rango de 75 mm y resolución de 0.15 mm en el eje Z, con un rango mínimo de 30 mm y resolución de 0.05 mm en el eje X, que permite obtener 283 puntos/perfil. Los límites descritos son aceptables para llevar a cabo procesamiento de laser cladding.



Figura 2.9: Escaner laser MEL M2DW 75/30 y montaje del mismo en sistema de traslacion

El sistema tiene instalado un filtro de banda estrecha que permite proteger el sensor de la influencia de la luz externa hasta 5000 lx y se ha colocado en la muñeca del brazo robotico, de modo que sea posible desplazarlo sobre las piezas a tratar. El laser que emplea para realizar las mediciones emite en el rango del visible, siendo la luz de color rojo (longitud de onda de 658 nm). La frecuencia de muestreo de la camara CCD que se emplea para calcular las coordenadas es aproximadamente 50 Hz (51.7 Hz) empleando el reloj interno del equipo, mientras que puede llegar a un máximo de 75 Hz empleando un reloj externo como *trigger*

Este elemento puede conectarse a una red Ethernet y comunicarse con otros nodos de la misma enviando y recibiendo paquetes TCP/IP. Es posible configurar el sistema y obtener las medidas almacenadas en el buffer interno del equipo empleando una serie de comandos detallados en el manual correspondiente. La velocidad de transmisión es suficiente como para permitir el envío de los datos tan pronto como la imagen llega al buffer del sistema.

2.2.9. Alimentador de polvo

Este sistema auxiliar se empleará para conseguir que el material a fundir alcance el sustrato durante el proceso, con unos parámetros establecidos para el flujo masico de velocidad, densidad de polvo, etc.

El alimentador de polvo es un Sulzer-Metco Twin-10c, posee una doble etapa de alimentación y ha sido modificado para permitir su manejo mediante los controles manuales, o externamente empleando el controlador del robot u otro sistema que sea capaz de enviar una señal analógica que se utilizara para establecer el flujo volumetrico deseado.

Las dos etapas de alimentación pueden ser utilizadas y controladas de modo independiente y, debido a ello, es posible inyectar polvo de un único material, o bien de dos materiales distintos al mismo tiempo. Es posible utilizar polvo de diversos tamaños de partícula y permite conseguir flujos de 2 g min^{-1} a 150 g min^{-1} .



Figura 2.10: Alimentador de polvo Sulzer-Metco Twin-10c modificado

Usando el montaje actual, es posible depositar materiales con gradiente de concentración, obteniendo diferentes composiciones en capas sucesivas. Aunque con la configuración actual es posible modificar el valor de ambas etapas de alimentación dinámicamente durante el proceso de cladding, no es realmente útil debido al gran retardo que se produce hasta que se estabiliza la nueva mezcla gas-polvo y alcanza la herramienta de trabajo. Si es factible realizar dicho cambio entre capas.

Se ha diseñado pero no implementado un sistema que permite conectar el sistema a una red Ethernet, que puedan enviarse comandos a través de dicha red para modificar el valor del flujo de gas de transporte o la velocidad de rotación del disco del polvo, así como para medir el flujo de gas y si la cantidad de polvo restante de la tolva ha alcanzado un valor inferior al establecido como límite de seguridad.

2.2.10. Sistema de sincronizacion y automatizacion

Este sistema auxiliar se empleara para controlar la secuencia de pasos necesarios para llevar a cabo el proceso de tratamiento, ya sea de laser cladding o de medicion empleando el escaner laser.

Tanto el *hardware* como el *firmware* del sistema de sincronizacion y automatizacion es un diseño propio basado en la plataforma OSHW Arduino ¹. El equipo puede conectarse a una red Ethernet y comunicarse con los distintos nodos del sistema utilizando paquetes UDP o TCP/IP. Se empleara para activar o desactivar el *hardware* de modo sincronizado, permitiendo llevar a cabo las tareas de modo planificado siguiendo una secuencia logica. Es importante reseñar que el sistema no funciona en tiempo real, por lo que resulta adecuado unicamente para llevar a cabo cierto tipo de tareas.

Aunque se han desarrollado varias versiones para diferentes tratamientos laser, se describira unicamente la mas completa y avanzada, configurada actualmente para llevar a cabo procesos de laser cladding. El sistema lleva a cabo el siguiente conjunto de tareas:

- Establece comunicacion con el *software* CAM para recibir y enviar informacion acerca del estado actual del proceso y del *hardware*. Por ejemplo, permite determinar si el sistema robotizado se encuentra realizando una tarea y evita que comience una nueva hasta que finalice la actual, recibe informacion desde el *software* CAM para detener el sistema robotizado hasta que se hayan completado los calculos necesarios para realizar el siguiente grupo de trayectorias, etc.
- Envia orden al controlador del robot para iniciar los diferentes programas, que previamente se han almacenado en el mismo utilizando el *software* CAM. Cuando se llevan a cabo procesos en los que es necesario depositar capas sucesivas el sistema gestiona todos los pasos del mismo (p.e. arranques, paradas, esperas durante los periodos de almacenamiento de las nuevas trayectorias...) sin intervencion humana.
- Puede actuar como *trigger* externo del escaner laser, cuando este ultimo se encuentra configurado para trabajar en dicho modo. Permitira establecer una frecuencia de muestreo para el escaner laser, empleando un tren de pulsos que estara activo desde el primer hasta el ultimo punto de la superficie a escanear.

El sistema tiene E/S digitales optoacopladas adicionales que pueden ser empleadas para controlar cualquier otro *hardware* que fuese necesario para llevar a cabo el proceso. El *firmware* del equipo puede interpretar diversos comandos y ha sido diseñado para que sea sencillo añadir nuevas capacidades de modo sencillo.

2.2.11. Tarjeta de adquisicion de datos

Este sistema auxiliar permite llevar a cabo el almacenamiento de los datos procedentes de los sensores opticos, asi como enviar la señal que permite establecer la potencia de salida del laser cuando se activa el sistema de control basado en la combinacion de este equipo con un ordenador dedicado.

La tarjeta de adquisicion de datos es una National Instruments PCI-6024E. Permite una frecuencia de muestreo total de 200 kHz con una resolucion maxima de 12-bit para 16 entradas analogicas, 2 salidas analogicas y 8 E/S digitales. Para utilizarla se empleara el entorno Labview, una herramienta de programacion simbolica de codigo cerrado, o bien una aplicacion propia basada en el SDK de National Instruments (de codigo cerrado pero multiplataforma y gratuita),

¹<http://arduino.cc>

siendo en ambos casos necesario el uso de un ordenador dedicado. Aunque la elaboracion de la aplicacion ha sido mas laboriosa que implementar el mismo algoritmo en Labview, se ha realizado dicha tarea porque el resultado final es mas flexible y facil de mantener o modificar. Dicho *software* necesita un OS convencional (WinXP o Linux) para funcionar y controlar la tarjeta le permitira:

- Monitorizar el estado del laser para activar el muestreo de señales analogicas y la grabacion de la camara CMOS.
- Leer datos procedentes de los sensores analogicos con salida desde 0 V a 10 V cuando el laser se encuentra activado, y, una vez finalizado el tratamiento, salvar dichos datos en un formato legible (ASCII puro) y facil de procesar
- Actuar como sistema de control de lazo cerrado, en concreto de tipo PID. Es posible fijar los valores proporcional, integral y derivativo, asi como el intervalo de refresco entre medidas/pasos de control, antes de que el proceso comience.

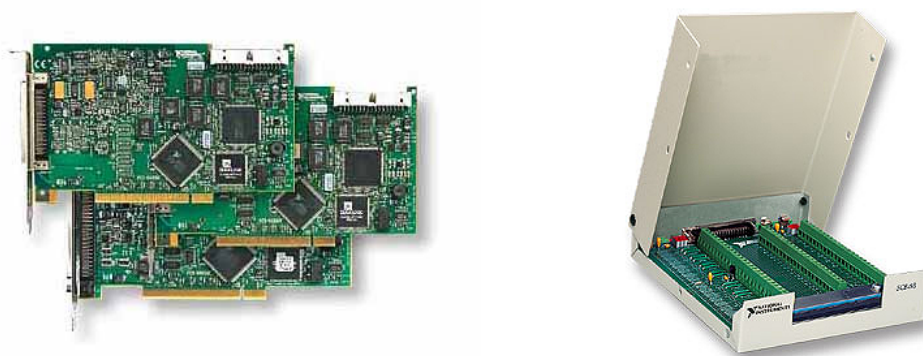


Figura 2.11: Tarjeta de adquisicion de datos y borneros auxiliar

Tanto la consigna como la señal de realimentacion, en este caso la procedente del fotodiodo, se conectaran cada una a una entrada analogica. Una vez leidas ambas señales, los calculos necesarios para obtener el valor de la variable sobre la que se actuara para controlar el proceso, en este caso la potencia de salida del laser, se llevan a cabo en el ordenador. Una vez realizados dichos calculos se modificara el valor de una salida analogica, asociada de modo previo a la variable anteriormente indicada. El proceso se repetira con la frecuencia preestablecida mientras el laser permanezca encendido. Una vez finalizado el tratamiento, los parametros del control, el valor instantaneo de las dos señales empleadas para calcular el valor de salida del sistema de control, el propio valor de salida seran salvados en un formato legible (ASCII puro) y facil de procesar.

Aunque el sistema funciona, ha aparecido una serie de problemas relacionados con la falta de tratamiento de datos en tiempo real cuando se emplea un OS conveccional. Cuando se activa el control del lazo cerrado, el OS enviara a la tarjeta los comandos necesarios para leer las entradas analogicas, realizara los calculos y enviara a la tarjeta los comandos necesarios para escribir la salida analogica, pero este conjunto de tareas tendran asignada una prioridad, pudiendo retrasarse su ejecucion en caso de que una tarea critica del OS deba ser procesada. Normalmente, este problema tiene poco impacto en los resultados, sobre todo si el SO se configura para reducir el numero de interrupciones, pero existe. Para evitarlo se puede recurrir a emplear la herramienta basada en Labview, que reserva parte de los recursos *hardware* del ordenador

dedicado, o bien diseñar un sistema autonomo de adquisicion de datos y control que ejecute las operaciones en tiempo real.

El equipo ha sido incorporado al proceso de laser cladding, pero podria emplearse sin apenas modificaciones para otros tratamientos laser con requisitos semejantes.

2.2.12. Sistema autonomo de adquisicion de datos y control

Este sistema auxiliar se ha empleado para sustituir la tarjeta de adquisicion de datos, ya que, en la actualidad, realiza exactamente las mismas tareas (salvo actuar como *trigger* de inicio para la camara CMOS). El equipo se ha diseñado para resolver los problemas existentes en el proceso que se realizaba empleando la tarjeta, abaratando costes, simplificando el sistema y aumentando las capacidades del mismo.

Tanto el *hardware* como el *firmware* del sistema autonomo de adquisicion de datos y control es un diseño propio basado en la plataforma OSHW Arduino. El equipo puede conectarse a una red Ethernet y comunicarse con los distintos nodos del sistema utilizando paquetes UDP o TCP/IP, aunque tambien dispone de un puerto USBSerial. Aunque el sistema dispone de mayor numero de E/S que las descritas, se indicaran unicamente aquellas que se han utilizado: dos entradas analogicas, acondicionandolas para que toleren valores de 0 V a 10 V con una resolucion de 10-bit, una salida analogica que puede variar de 0 V a 10 V con una resolucion de 12-bit, una entrada digital optoacoplada que permite conocer el estado del laser y una salida digital. Este sistema presenta varias ventajas como pueden ser evitar el uso de herramientas de codigo cerrado, no requerir un ordenador dedicado y poder tomar un numero ilimitado de muestras, sin tener que indicar su numero previamente.

El equipo puede operar en regimen de lazo abierto o cerrado, y, en este ultimo caso, como un control PID basico o como PID adaptativo, con un tiempo de muestreo/refresco minimo de 5 ms. El sistema se ha diseñado de modo que sea sencillo efectuar las modificaciones que permitan su funcionamiento como PID en cascada. En todo momento, a medida que se lleva a cabo el proceso, a traves del puerto USB se envian los valores instantaneos de consigna, de la variable de realimentacion y de la variable sobre la que se actuara para controlar el proceso, por lo que el sistema puede emplearse como sistema de muestreo, ademas de como sistema de control. Adicionalmente, es posible modificar los valores de los distintos parametros de control, incluso de modo dinamico, mientras el proceso esta en marcha y puede realizarse de modo automatico empleando el controlador del robot u otro nodo conectado a la misma red que pueda enviar comandos utilizando un socket.

2.3. Montaje para micromecanizado

2.3.1. Micromecanizado laser

El micromecanizado laser es un proceso de mecanizado basado en la extraccion, mediante fusion o vaporizacion, del material de la pieza a tratar, con una precision en el rango de los centenares a las decenas de micrometro (en el sistema de ejemplo se han obtenido surcos de 20 μm). Ademas del elevado grado de precision que es posible alcanzar mediante su uso, este proceso, debido a su mecanismo de actuacion, permite tratar materiales tradicionalmente dificiles de mecanizar por su fragilidad, como puede ser vidrio o ceramica y, debido a las propiedades de la herramienta, en ciertos materiales permite la realizacion de mecanizados interiores sin necesidad de orificio de entrada de tamaño igual o superior al mecanizado interior.

2.3.2. Descripcion global

El conjunto de sistemas que se describiran a continuacion se emplean para llevar a cabo procesos de micromecanizado. Es la mas sencilla de las tres configuraciones de trabajo descritas, constando unicamente de dos de los elementos tipo descritos en el esquema general. Todos los elementos se encuentran conectados entre si, ejecutandose todos los pasos requeridos, de modo secuencial, hasta finalizar el proceso, todo ello de modo automatico.

- El sistema de traslacion empleado es un conjunto de 3 platinas de traslacion motorizadas que se emplean para desplazar la pieza a mecanizar, con la velocidad y distancia a la herramienta deseadas, recorriendo una trayectoria precalculada mientras el sistema para tratamiento con laser permanece inmovil. Esta configuracion es factible porque, normalmente, las piezas a tratar son de pequeño tamaño y lo bastante ligeras como para ser colocadas en dicho sistema, ademas de emplearse, de modo general, bajas velocidades para efectuar tratamientos de micromecanizado. Empleando esta aproximacion, es posible tener un sistema de muy elevada precisión con un coste relativamente bajo. Las platinas de traslacion son manejadas mediante un controlador que se comunica con un ordenador en el que se ejecuta el *software* CAM.
- El sistema para tratamiento con laser es un laser de nanosegundo que emite en la longitud de onda ultravioleta. Sus características permiten su uso para producir ablacion termomecanica y causar cambios locales de tipo termoquimico. Los parametros del laser pueden ser modificados durante el proceso, pero el sistema no recibira los comandos en tiempo real, por lo que, salvo casos particulares, no se recomienda efectuar dichos cambios mientras se esta llevando a cabo el proceso y la herramienta esta encendida.

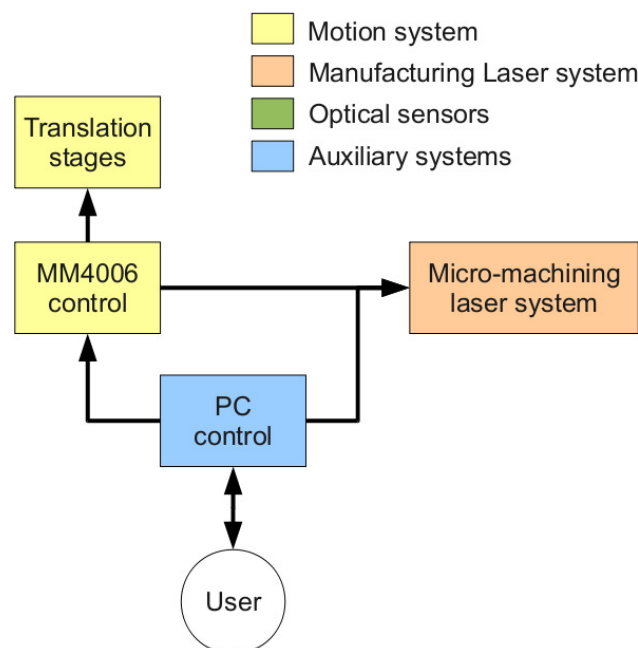


Figura 2.12: Diagrama que muestra montaje que permite llevar a cabo procesos de micromecanizado laser

2.3.3. Platinas de traslacion motorizadas y controlador

Las platinas de traslacion instaladas son tipo Newport ILS-CC con una resolucion de $0.1\ \mu\text{m}$ en cada uno de los ejes y una repetibilidad de $0.4\ \mu\text{m}$. Por otra parte, el controlador instalado

es tipo Newport MM4006.

Dicho controlador se empleara para desplazar las platinas y encender y apagar la herramienta laser mediante una señal de salida digital tipo TTL. El MM4006 puede recibir comandos que permiten efectuar desplazamientos a puntos en el espacio tridimensional de modo libre, o dicho de otra manera, cuando se solicita este tipo de desplazamiento, los ejes se moveran de modo asincrono para alcanzar la posicion indicada. Por otra parte, tambien tiene la capacidad de llevar a cabo desplazamientos condicionados o forzados, pudiendose controlar dos de los tres ejes simultaneamente. Los comandos disponibles de desplazamiento forzado son lineas rectas y arcos de circunferencia, ambos bidimensionales y contenidos en el plano XY , YZ o XZ . El sistema permite el almacenamiento de programas o series de comandos que se iran ejecutando de modo sucesivo.

La comunicacion con el sistema se lleva a cabo a traves de un puerto serie, usando un conjunto de comandos detallados en el manual, siendo ademas posible ejecutar programas previamente almacenados en el sistema empleando dicho puerto.



Figura 2.13: Platinas de traslacion y controlador Newport

2.3.4. Sistema laser para micromecanizado

El laser de micromecanizado es un Coherent AVIA Ultra 355–2000 Nd:YVO4 Laser, que emite en la longitud de onda de los 355 nm y con una duracion de pulso de 25 ns. El perfil de intensidad en la salida del laser es casi Gaussiano ($M^2 < 1,3$) y el diametro del haz, con un nivel de intensidad de $1/e^2$, mide aproximadamente 2.2 mm. El haz laser presenta polarizacion vertical ($> 100 : 1$). La tasa de repeticion de pulsos es seleccionable y varia entre un unico pulso y 100 kHz, con un valor estimado de energia por pulso de 0.1 mJ.

La emision laser puede ser activada o desactivada empleando una señal externa tipo TTL. Los parametros del sistema pueden modificarse mediante el uso de los comandos correspondientes, enviados a traves del puerto serie. La señal TTL anteriormente mencionada se enviara desde el controlador MM4006 (o equivalente) para sincronizar el encendido o apagado del laser cuando se alcanzan determinadas posiciones.

La obtencion de un sistema de control externo que permitiese interactuar con este laser supera el alcance del presente trabajo, puesto que requiriria una aproximacion y metodologia distintas a las empleadas para controlar el laser del proceso de cladding, debido, entre otras cosas, al caracter pulsado y modo de ejecutar comandos del mismo.

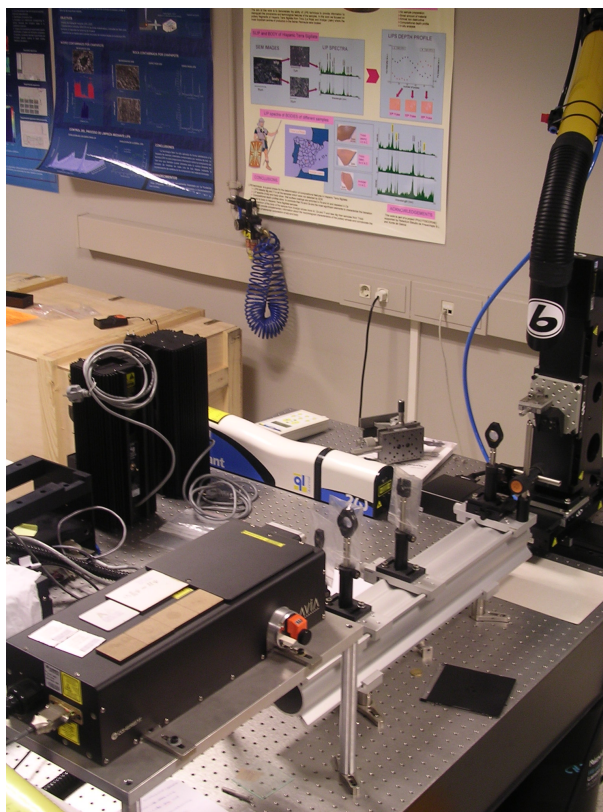


Figura 2.14: Laser AVIA Ultra 355–2000 Nd:YVO4

2.4. Montaje para soldadura hibrida laser-arco

2.4.1. Soldadura hibrida laser-arco

La soldadura hibrida Laser-arco es un proceso de union que representa una alternativa a la tecnicas tradicionales de soldadura que se usan actualmente en la industria. En el ejemplo considerado, se basa en la combinacion de la soldadura laser con la soldadura GMA, obteniendo los beneficios de ambas tecnicas y minimizando los problemas de ambas, a cambio de un mayor nivel de complejidad de proceso. El arco electrico se desplaza por delante, fundiendo el metal del hilo del electrodo, que es transferido en forma de gotas a la pieza, mientras el haz laser hace hervir el metal, generando un conducto de vapor y permite que se produzca transferencia de energia a la zonas mas profundas del material, obteniendose velocidades de soldadura muy superiores a las de las tecnicas convencionales.

2.4.2. Descripcion global

El conjunto de sistemas que se describiran a continuacion se emplean para llevar a cabo procesos de soldadura hibrida Laser arco. Esta es la menos automatica de las tres configuraciones de trabajo y la descripcion de los elementos que no estan relacionados con los objetivos del presente trabajo sera deliberadamente breve, puesto que se incluyen unicamente para permitir al lector tener una vision global del sistema.

- El sistema de traslacion es una combinacion de dos elementos. El primero es un portico con 5 grados de libertad que se emplea para efectuar una trayectoria precalculada, desplazando tanto la herramienta laser instalada en el cabezal, como el cabezal de seguimiento de linea, ubicado tambien en el cabezal, con el angulo y velocidad deseados. El segundo es una mesa

de traslacion lineal que se emplea para desplazar la camara de alta velocidad y el sistema de laser pulsado de diodo para iluminacion. El controlador del sistema soporta comandos en G-Code y las operaciones de programacion del mismo se llevan a cabo de modo manual.

- El sistema para tratamiento con laser es un laser de fibra de alta potencia, de tipo continuo y que emite en la longitud de onda del infrarrojo, lo que lo hace adecuado para realizar tratamientos de tipo termico, como es el caso de la soldadura. El nivel de potencia de salida del sistema puede ser modificado en tiempo real.
- Los sensores opticos empleados son una camara de alta velocidad y un cabezal de seguimiento de linea. Ambos se emplean para evaluar los resultados de los tratamientos y estudiar los fenomenos fisicos que tienen lugar durante el proceso. La camara de alta velocidad se ha instalado en la mesa de traslacion lineal y grabara el area tratada *online*, puesto que se desplazara a la misma velocidad que la herramienta laser, manteniendo la distancia a la misma durante todo el proceso, focalizada en la zona de trabajo. El cabezal de seguimiento de linea esta instalado en el cabezal del portico, junto con la herramienta laser y se empleara para realizar medidas de la superficie *offline*, antes y despues de realizar el tratamiento.
- Los sistemas auxiliares estan conectados a diferentes elementos que son parte del montaje. Tanto el sistema de soldadura GMAW como el sistema de laser pulsado de diodo para iluminacion se configuran de modo manual y se activan mediante una salida digital del controlador del sistema de traslacion. El sistema de sincronizacion y automatizacion, que activa y configura el cabezal de seguimiento de linea, permite modificar los parametros de trabajo mediante un ordenador convencional y controlar la activacion del mismo empleando una salida digital del controlador del sistema de traslacion. Dicho sistema de sincronizacion y automatizacion no se describira, por ser una version simplificada del utilizado en el montaje para cladding.

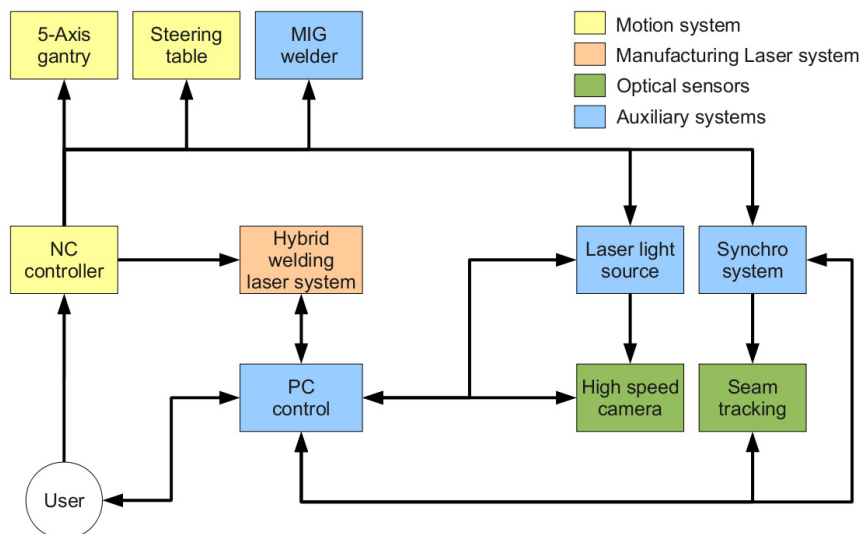


Figura 2.15: Diagrama que muestra montaje que permite llevar a cabo procesos de soldadura híbrida laser-arco

2.4.3. Portico, desplazador lineal y controlador

El portico de 5 grados de libertad y la mesa de traslacion lineal de 1 grado de libertad forman parte de un CNC ESAB y estan configuradas para permitir su desplazamiento de modo sincronizado. Se empleara para llevar a cabo procesos de soldadura hibrida laser-arco, pero no se empleara el *software* CAM para llevar a cabo el proceso, puesto que las trayectorias empleadas se limitaran a lineas rectas descritas por el TCP del cabezal de soldadura.

La mesa de traslacion ha sido configurada para moverse siguiendo los desplazamientos realizados por el TCP. Como ya se ha indicado, se ha instalado la camara de alta velocidad en dicha mesa de traslacion, a la altura e inclinacion adecuadas para poder obtener imagenes del area de trabajo a medida que se lleva a cabo el tratamiento, permitiendo recoger informacion relacionada con el impacto que tengan los defectos superficiales y/o geometricos. El sistema de iluminacion tambien se instalara en la mesa de traslacion, de modo que pueda desplazarse a medida que lo hace la herramienta laser.

El controlador del CNC dispone de lineas de E/S digitales que permiten controlar parte de los sistemas auxiliares, el sistema de soldadura GMAW y el sistema para tratamiento con laser. Las señales se emplean, como se ha indicado anteriormente, para activar y detener tanto el sistema de laser pulsado de diodo para iluminacion como el cabezal de seguimiento de linea.

Aunque este proceso se lleva a cabo manualmente empleando un teclado convencional, el CNC puede salvar e interpretar secuencias de comandos G-Code enviados a traves del puerto serie.



Figura 2.16: Vista general del sistema de traslacion empleado en soldadura hibrida laser-arco

2.4.4. Sistema para soldadura hibrida laser-arco

El sistema para tratamiento con laser que permite llevar a cabo procesos de soldadura hibrida laser-arco es un laser de fibra CW IPG YLR-15000 Ytterbium que emite en la longitud de onda de los 1070 nm con una potencia maxima de 15 kW.

Es un sistema modular, bombeado por diodos, cuyos parametros pueden ser modificados en tiempo real mediante sistemas externos conectados a sus entradas digitales y analogicas. Para los experimentos desarrollados, unicamente se ha empleado la entrada digital que permite activar o desactivar el haz, con los parametros que se hayan configurado previamente de modo manual.



Figura 2.17: Laser IPG YLR-15000

2.4.5. Cabezal de seguimiento de linea

Este sistema se ha empleado para analizar la pieza resultante una vez aplicado el tratamiento, teniendo la capacidad de medir el tamaño, los limites de estabilidad a nivel geometrico y la calidad general del cordón de soldadura, aunque el equipo no haya sido diseñado originalmente para llevar a cabo dicha tarea.

El cabezal de seguimiento de linea es un sistema modelo Servorobot Inc SMART 20 que consta de una linea laser y una camara. Para obtener los datos tratados del cabezal, se emplea un controlador, SMART Box, que funciona con *software* cerrado. Originalmente, el sistema permitia evaluar las condiciones de la superficie que se va a tratar, localizando la posicion de la junta y permitiendo que la herramienta pueda recorrerla, todo ello para procesos de soldadura laser convencional. La medida instantanea actual puede mostrarse graficamente por pantalla, empleando el *software* antes mencionado.

El sistema tiene un rango de trabajo de 20 mm en el eje Z y de 10 mm en el eje X , con una resolucion media de 23 μm , 480 puntos/perfil y una velocidad de muestreo de 30 Hz. Las mediciones pueden obtenerse, de manera limitada, directamente desde el controlador del sistema, empleando un conjunto de comandos detallados en el manual que se enviaran al sistema mediante un puerto serie.

Se ha instalado el cabezal de seguimiento de linea en el cabezal del portico, de modo que sea posible moverlo sobre la pieza de trabajo. El *buffer* del sistema no es lo bastante grande como para permitir el almacenamiento de mas de 1000 perfiles, y el sistema no puede enviar mas de 3 perfiles por segundo a traves del puerto serie.

2.4.6. Camara de alta velocidad

Se ha empleado para obtener imagenes de alta velocidad durante el proceso, que permiten analizar el impacto de los distintos parametros y cambios geometricos en la calidad final del cordón de soldadura.



Figura 2.18: Cabezal de seguimiento Servorobot SMART 20

El modelo de cámara de alta velocidad empleado es una Redlake HS-X3 y tiene una resolución máxima de 1280×1024 pixels con una velocidad máxima de 2000 fps empleando la resolución completa.

En los tratamientos de soldadura habitualmente aparece una gran cantidad luz emitida debida al propio proceso, que es necesario filtrar casi por completo, para a continuación iluminar la zona de trabajo con un sistema auxiliar y así visualizar un mayor número de detalles. Para conseguir este objetivo, se empleará una luz monocromática, coherente y pulsada, junto con un filtro de interferencia de la misma frecuencia que el sistema de iluminación y haciendo coincidir el tiempo de exposición de la cámara con el tiempo de pulso del sistema de iluminación.

En este caso concreto, la cámara se ha configurado para trabajar a 2000 fps, con un filtro que permite el paso de la longitud de onda de 810 nm. Adicionalmente, se ha inclinado 45° con respecto al plano de la superficie de trabajo, enfocando la zona de trabajo desde el lateral. Como ya se ha indicado, la señal que hace que comience la grabación procede de una salida digital del controlador del CNC.

2.4.7. Sistema de soldadura GMAW

El sistema de soldadura empleado es un ESAB Aristo LUD450W con un controlador Aristo U8 Computer Control Pendant y un alimentador de hilo A10 MEK 44C. Los distintos parámetros del sistema pueden ser modificados a través de una conexión tipo CAN-bus, pero en el caso descrito se han configurado manualmente los ajustes relativos al proceso de soldadura, siendo automático solo la activación del sistema en el momento en que recibe una señal digital externa procedente del controlador del CNC, siendo en este caso la misma que activa el sistema para tratamiento con láser.

2.4.8. Sistema de láser pulsado de diodo para iluminación

Este sistema permite mantener iluminada la zona que va a ser grabada, siendo posible su sincronización con la cámara de alta velocidad.

El sistema de láser pulsado de diodo para iluminación es un Cavitar Cavilux HF con una potencia máxima de 500 W. Dicho sistema puede generar trenes de pulsos configurables, desde pulsos de 2 μ m con una frecuencia de 10 kHz hasta pulsos de 100 ns con una frecuencia de 200 kHz. El sistema emite en la longitud de onda de 810 nm y el haz se lleva mediante fibra óptica hasta un sistema de lentes que permite ajustar el área de iluminación.

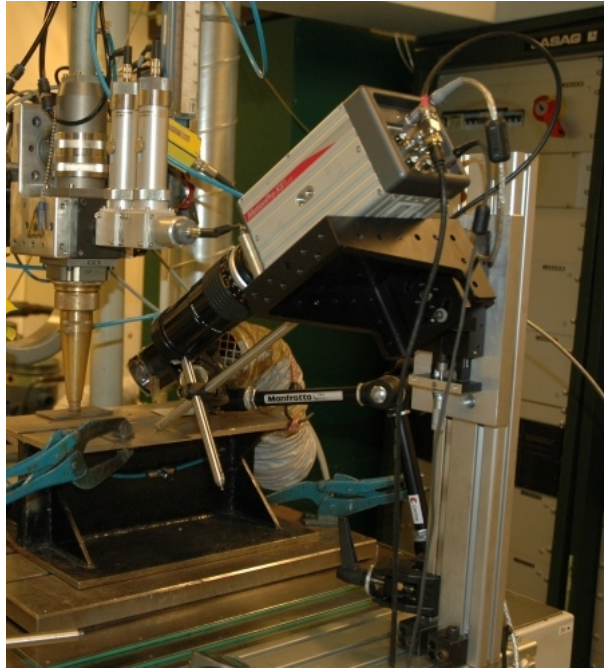


Figura 2.19: Camara de alta velocidad Redlake HS-X3

En el caso concreto descrito, el controlador del laser se ha configurado como disparador de la camara, enviando una señal con un retardo determinado despues de cada pulso. La zona de trabajo se ha iluminado con pulsos de $0.5\ \mu\text{m}$ con una frecuencia de 2 kHz emplando un valor de potencia de 500 W.



Figura 2.20: Laser de iluminacion Cavitar Cavilux HF

Capítulo 3

Generacion de trayectorias

Uno de los principales objetivos del presente trabajo es proponer un metodo para calcular y evaluar las trayectorias que permiten llevar a cabo un determinado movimiento. A continuacion se describen los pasos necesarios, proponiendo previamente una solucion general a la hora de definir y describir trayectorias a partir de cierta tipologia de elementos, así como para su almacenamiento, teniendo en cuenta las necesidades que lleva aparejadas la realizacion de la trayectoria, siempre vinculada a cierto tipo de proceso y herramienta. A posteriori se detallan los procedimientos para su realizacion empleando un modelo concreto de sistema de desplazamiento, en este caso un robot industrial.

Considerese $I \subset \mathbb{R}$ un intervalo y considerese $r : I \longrightarrow \mathbb{R}^3$ una curva parametrizada en el espacio que asumiremos regular y libre de puntos de inflexion, es entonces posible describir $\vec{r}(t)$ como la trayectoria de una partícula que efectua un movimiento en un espacio tridimensional. Debido a que es posible considerar las lineas rectas y los puntos como casos particulares de una curva, cualquier trayectoria 3D puede ser descrita usando una serie de curvas concatenadas $\vec{r}_i(t)$, es por ello que, en adelante y a lo largo de este capitulo, se considerara que el termino curva engloba cualquier elemento de trayectoria posible. Para llevar a cabo una trayectoria tridimensional utilizando un sistema de traslacion con una herramienta instalada en el mismo es necesario recorrer todos los puntos que pertenecen a dicha trayectoria, modificando la orientacion de la herramienta en funcion de las condiciones geometricas de los mismos. Este movimiento tendra que cumplir ciertas condiciones relacionadas con el tipo de proceso que esta siendo llevado a cabo. En general, cuando se usa una herramienta laser, para obtener trayectorias validas que permitan obtener un resultado de buena calidad es necesario que se cumplan las siguientes condiciones:

- La herramienta laser debe mantener un valor de velocidad constante durante el movimiento: Esta es una condicion habitual en cualquier proceso de mecanizado pero, en general, no es necesario que se cumpla todo el tiempo y en cualquier condicion (por ejemplo, es tipico efectuar cambios en la velocidad de rotacion de la herramienta o en la de avance durante un proceso de fresado cuando la situacion lo requiere). Sin embargo, en el caso del laser es habitual que haya que mantener dicha velocidad constante durante todo el proceso para evitar un efecto acumulativo que provoque sobrecalentamientos o distribuciones de energia irregulares en la zona sometida a la irradiacion. Aunque esto es cierto de modo general, existen excepciones, ya que en algunos casos un cambio de velocidad controlado es deseable para obtener mejores resultados durante transitorios o procesos de naturaleza inestable.
- La herramienta debe mantener una distancia constante a la trayectoria durante el movimiento: Es otra condicion habitual en cualquier proceso de mecanizado tipico. Durante un proceso de tratamiento empleando el laser como herramienta es importante que se cum-

pla esta condicion, porque de otro modo, podria distorsionar los valores de densidad de energia durante el proceso. Los efectos y excepciones son aproximadamente equivalentes a los descritos en la condicion anterior. Adicionalmente, los cambios en la distancia afectan mucho a las medidas obtenidas mediante sensores opticos debido a que se producen cambios en el tamaño y forma del area a medir.

- La herramienta debe mantener la orientacion correcta durante el movimiento: Es menos comun, ya que en algunos casos la herramienta permite efectuar el tratamiento en multiples direcciones de manera adecuada, pero tambien es importante en algunos procesos de mecanizado. En el caso de emplear una herramienta laser es un parametro fundamental, ya que la interaccion entre el haz laser y las superficies a tratar tiene una importante componente geometrica. Esto es debido a que la reflectividad se incrementa conforme crece el angulo entre el eje axial del laser y la normal de la superficie a tratar.
- La herramienta no puede ser rotada alrededor del eje axial del laser: Con frecuencia es necesario evitar realizar rotaciones de gran magnitud cuando las herramientas tienen sistemas de refrigeracion externos, mangueras, sistemas de extraccion de gases y otros elementos susceptibles de sufrir daños al retorcerse. En el caso de las herramientas laser, muchas de ellas usan una fibra optica refrigerada para llevar el haz de la fuente laser hasta la herramienta de trabajo. Hay, sin embargo, excepciones, como los lasers compactos de CO_2 , que pueden situarse en cualquier angulo de trabajo sin problemas, ya que laser y cabezal forman la herramienta integramente.

Estas condiciones deben cumplirse tambien en el caso particular del procesado de piezas utilizando la tecnica de laser cladding. A continuacion se explican con mas detalle las razones fundamentales para que sea asi.

- Se ha descrito que (Ver [22]) la existencia de diferencias de velocidad durante los procesos de laser cladding dan lugar a cordones con altura, anchura, dilucion y HAZ no uniformes debido a variaciones en la cantidad de masa de polvo fundida, la distribucion de temperatura en el cordon y el material del sustrato.
- Se ha descrito que (Ver [46]) el uso de una distancia excesivamente alejada de la adecuada para realizar el proceso tiene como resultado un incremento en el numero de particulas que no llegan a fundirse, obteniendose un cordon de menor calidad, una reduccion en la eficiencia y otros problemas equivalentes a los que aparecen cuando se producen cambios en los valores de velocidad.
- La orientacion de la herramienta durante un proceso de laser cladding es incluso mas importante que en otros procesos de tratamiento laser no aditivos porque, ademas de los problemas generales descritos debidos a la reflectividad, se ve afectada negativamente la forma del cordon, ya que esta puede ser modificada por el angulo de la superficie (Ver [25]) y el efecto de la gravedad sobre la inyeccion de polvo (Ver [26]). En el caso estudiado, debido al diseño de la boquilla del cabezal de laser cladding con inyeccion de polvo coaxial continua, se ha descrito que el angulo de inclinacion maximo permitido para la herramienta, asumiendo que se pretende evitar efectos gravitatorios, es 15° aunque algunos autores consideran que es posible elevar este valor hasta 20° sin que existan efectos realmente apreciables. Se ha optado por la aproximacion mas conservadora, a fin de evitar problemas relacionados con posibles cambios en este limite, debidos a la geometria de la boquilla coaxial (Ver [17]).
- En el caso de estudio, la herramienta no se rotara alrededor del eje axial del laser porque esto podria causar daños en la fibra. En cualquier caso, hay que tener en cuenta que

el cabezal de laser cladding empleado tiene simetria axial, por lo que, a priori, es una operacion no necesaria para realizar los procesos. Es importante indicar que, aunque esto es cierto en la mayor parte de sistemas de laser cladding, no sucede en todos ellos, ya que existen sistemas de boquilla lateral, en los que es necesario girar la herramienta para llevar a cabo ciertas trayectorias.

A continuacion se resume el proceso general que se empleara para generar las trayectorias y cumplir las condiciones previstas:

- El usuario definira la combinacion de posicion y orientacion de la herramienta que se pretende alcanzar.
- La posicion de la herramienta se describira como las coordenadas de un punto determinado de la misma, llamado punto central de la herramienta ó TCP (ver 3.1.1), en el sistema de referencia absoluto del sistema, en un sistema de referencia seleccionado previamente.
- La orientacion de la herramienta se describira mediante un conjunto de angulos de Euler (ver A.2), descritos en relacion al sistema de referencia de la propia herramienta, de modo que no es necesario modificar su valor en caso de que cambie la direccion si el objetivo es mantener una inclinacion determinada con respecto al desplazamiento.
- Todas las coordenadas y angulos se transformaran al sistema de referencia absoluto del sistema de desplazamiento.
- El conjunto de coordenadas y angulos que forman la trayectoria se utilizara para generar comandos del sistema de desplazamiento. La trayectoria se dividira en tramos realizables por el sistema (de modo general, puntos, lineas rectas o arcos de circunferencia) y se precalculara el movimiento final a realizar para evaluar si es realizable sin variar la velocidad, o es necesario partir la trayectoria. En el caso de ejemplo, particularizado para un brazo robotico industrial, es necesario convertir los datos a coordenadas, cuaternios y cuadrantes del sistema de referencia del robot para poder llevar a cabo el movimiento. Esta conversion dista de ser trivial, pero se describe una aproximacion general para robots con 6 grados de libertad al final del presente capitulo.

3.1. Conceptos generales

A continuacion se definen una serie de conceptos que es necesario conocer para comprender el metodo propuesto para efectuar la generacion y ejecucion automaticas de trayectorias que sera descrito mas adelante. Ademas de los aqui descritos, se ha incluido informacion relativa a las rotaciones de sistemas de coordenadas (ver A.1) y los angulos de Euler (ver A.2)

3.1.1. Definicion de punto central de herramienta (TCP) en un espacio tridimensional

Es habitual en el mundo de la robotica industrial describir la parte de la herramienta cuyo movimiento se controla como punto central de la herramienta o TCP, pero el concepto es facilmente extrapolable a cualquier tipo de sistema de traslacion. Se describe como un punto orientado virtual del espacio, que sera origen del sistema de coordenadas de la herramienta y cuya posicion y orientacion pueden ser calculados a partir de la posicion o angulo de cada servo del robot, o bien, en caso de otros sistemas de traslacion, a partir de las posiciones relativas de sus subsistemas de giro y/o desplazamiento. Aunque es posible definirlo como un

punto estacionario en el espacio, en este caso, debido al caso de ejemplo descrito, se optara por definirlo como un punto que se traslada por el espacio junto con el desplazador, esto es, que esta vinculado a una herramienta movil. Cuando el sistema de desplazamiento ejecuta un programa para llevar a cabo una trayectoria tridimensional, sera el TCP el punto que va a recorrer dicha trayectoria y moverse a la posicion objetivo prevista.

Como se ha indicado, constituye ademas el origen del sistema de coordenadas de la herramienta, que, en el caso de un robot industrial convencional, se fija por defecto en el centro de la muñeca del brazo, manteniendo el eje Z perpendicular a la misma. En casos como el del ejemplo, por comodidad y para hacer mas intuitivo el proceso, normalmente se describen uno o mas TCP, relacionados con el definido por defecto, normalmente en el punto de la herramienta colocada en el extremo de la muñeca mas representativo, o aquel donde existe contacto con la pieza a tratar. Para definir estos nuevos TCP, es necesario conocer las coordenadas de un punto tridimensional $(x_{TCP}, y_{TCP}, z_{TCP})$ referidas al sistema de referencia por defecto de la herramienta, asi como describir la nueva orientacion de dicho punto tridimensional, para poder describir el nuevo sistema de referencia. En el caso de ejemplo descrito, el TCP empleado tiene la peculiaridad de estar situado fuera de la propia herramienta, ya que se tomara el punto coincidente con la distancia focal en eje axial de la herramienta.

coordinates of a three-dimensional spatial point (x_p, y_p, z_p) to set the position of a reference point with well know distances relative to the default tool coordinate system. For the current case the Tool Center Point is specified in the absolute or base coordinate system of the robot

3.1.2. Sistemas de referencia de trabajo

El sistema de coordenadas de la herramienta, fijado en el TCP, puede coincidir en orientacion con cualquier otro sistema de referencia, pero las orientaciones mas utiles son las descritas a continuacion:

- Orientacion coincidente con el sistema de referencia absoluto del desplazador: Permite mantener la orientacion de la herramienta constante a lo largo de todo el proceso. Por ejemplo, es util para realizar mediciones con un escaner laser o sondas tipo palpador que esten fijados en la muñeca del robot. De este modo, cualquier medida estara referenciada directamente al sistema absoluto.
- Orientacion coincidente con el triedo de Frenet de una curva de la trayectoria: Permite seguir de modo preciso una trayectoria tridimensional seleccionada por el usuario. En este caso, la orientacion real de la herramienta variara a medida que cambie la curva, manteniendo la inclinacion seleccionada por el usuario en relacion al sistema de referencia de cada punto de la curva seleccionada. Por ejemplo, es util para realizar aportacion de material en zonas con inclinacion durante procesos como DMD
- Orientacion coincidente con el sistema de referencia obtenido en cada punto de la curva trazada sobre la superficie, teniendo en cuenta que se considerara la normal de la superficie en cada punto como eje Z del mismo: Permite mover la herramienta siguiendo el perfil de la superficie. Por ejemplo, es util para soldar o recubrir una superficie irregular, ya que facilita mantener constante la distancia de la herramienta a la superficie y la orientacion de la misma normal a la superficie.

Para evitar problemas relacionados con la inversion de la herramienta durante el desplazamiento, la componente z del vector que define la orientacion de la herramienta tiene que permanecer con valor positivo a lo largo del proceso, salvo que el cambio se deba a una variacion continua de la magnitud del vector en la direccion considerada, dicho de otro modo, al menos uno de los

puntos de la trayectoria debe tener la componente z del vector de orientacion con valor nulo, produciendose un cambio de signo a continuacion.

En el caso de ejemplo es potencialmente catastrofico invertir la componente z de la herramienta, ya que supondria que el polvo no alcanzaria el TCP, cayendo dentro del cabezal mientras el laser esta encendido, pudiendo ademas, romperse la fibra en el proceso, al envolverse en el robot. Es por ello que en este caso, se añade la condicion adicional de que no puede producirse un cambio de signo, teniendo que mantenerse positivo en todo momento. De modo estricto, para evitar efectos no deseados debido a la gravedad, en el caso de ser empleado para uso industrial seria conveniente limitar el rango de valores de inclinacion del sistema a los valores descritos previamente.

Sistema de referencia absoluto del desplazador

Es dependiente de la tipologia de sistema de desplazamiento empleado, pero, por definicion, siempre estara definido, ya que es una condicion necesaria para poder realizar cualquier tipo de desplazamiento controlado.

En el caso de los robots industriales, en general se ubica en la parte frontal de la base de los mismos, con una base ortonormal, siendo el sentido positivo del eje X el mismo que el que tendria el vector resultante de unir el centro de giro de la base con su parte frontal y el sentido positivo del eje Z el mismo que el que tendria el vector resultante de unir la parte inferior de la base con la parte superior de la misma y paralelo al eje de giro de dicha base.

Sistema de referencia asociado a la curva o triedro de Frenet

El triedro de Frenet es una base ortonormal de tres vectores $\hat{T}(t)$, $\hat{N}(t)$, $\hat{B}(t)$ definidos del modo siguiente:

$$\begin{aligned}\hat{T}(t) &= \frac{\vec{r}'(t)}{\|\vec{r}'(t)\|} \\ \hat{N}(t) &= \frac{\hat{T}(t)'}{\|\hat{T}(t)'\|} \\ \hat{B}(t) &= \hat{T}(t) \times \hat{N}(t)\end{aligned}\tag{3.1}$$

donde $\hat{T}(t)$ es el vector tangente unitario, $\hat{N}(t)$ es el vector normal unitario y $\hat{B}(t)$ es el vector binormal unitario. Este conjunto de vectores puede ser utilizado para describir el sistema de referencia de la herramienta, a medida que el TCP se desplaza a lo largo de una curva continua y diferenciable en un espacio tridimensional. Como se ha indicado, es posible definir para cada punto un triedro que puede ser utilizado para calcular la posicion de los distintos actuadores del sistema de desplazamiento, de modo que la herramienta adopte la orientacion deseada. Cuando la herramienta tiene que recorrer la trayectoria sin ningun tipo de inclinacion, esto es, cuando los valores de los angulos de Euler son nulos ($\psi = 0, \theta = 0, \varphi = 0$), entonces el vector orientacion de la herramienta es igual al vector binormal.

Sistema de referencia de la superficie

Sea S una superficie tridimensional definida de modo implicito como $F(x, y, z) = 0$. Cada uno de los puntos obtenidos a partir de trazar una trayectoria sobre la superficie tendra asociado un triedro que se puede describir como una base ortonormal de tres vectores $\hat{T}(t)$, $\hat{n}(t)$, $\hat{u}(t)$

definidos del modo siguiente:

$$\begin{aligned}\hat{T}(t) &= \frac{r'(t)}{\|r'(t)\|} \\ \hat{n}(t) &= \frac{\nabla F}{\sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}} \\ \hat{u}(t) &= \hat{T}(t) \times \hat{n}(t)\end{aligned}\tag{3.2}$$

donde \hat{T} es el vector unitario tangente a la trayectoria descrita sobre la superficie, \hat{n} es el vector normal a la superficie en el punto asociado al triedro y \hat{u} es el tercer vector que define la base, que se obtendra calculando el producto vectorial de los dos anteriores. Cuando la herramienta tiene que recorrer la trayectoria sin ningun tipo de inclinacion, esto es, cuando los valores de los angulos de Euler son nulos ($\psi = 0, \theta = 0, \varphi = 0$), entonces el vector orientacion de la herramienta es igual al vector normal a la superficie en el punto considerado.

3.2. Construcción de trayectorias

A lo largo del presente trabajo han de considerarse las trayectorias a realizar por el sistema de desplazamiento, como un conjunto de curvas tridimensionales sucesivas, tales que pueden ser recorridas a velocidad constante en el orden previamente establecido y en el sentido definido por la secuencia de puntos necesarios para describirlas.

Una vez establecida esta definicion, se procedera a describir los elementos que formaran las trayectorias, como se unen entre si y los elementos auxiliares necesarios para que el recorrido se pueda llevar a cabo a velocidad constante.

3.2.1. Elementos geometricos simples

La capacidad de movimiento de los sistemas de posicionamiento, con frecuencia, se fundamenta en alcanzar con el TCP las posiciones y orientaciones descritas, sin tener en cuenta la importancia de la posicion relativa de los distintos ejes del mismo debido a desplazamientos previos que, en algunos casos, como al emplear robots antropomorficos, resulta fundamental a la hora de discriminar si es factible o no la realizacion de un desplazamiento posterior, de un punto a otro del espacio a velocidad constante. Adicionalmente, es importante destacar que rara vez cuentan con movimientos forzados a traves de elementos geometricos complejos, siendo lo habitual que solo puedan realizar elementos simples, como lineas rectas y arcos de circunferencia.

A continuacion se describe brevemente la base de la aproximacion matematica que permite calcular trayectorias tridimensionales validas formadas por elementos simples y con orientaciones variables de herramienta. Igualmente se indican los datos minimos necesarios para definir un desplazamiento, siendo estos, de modo general, un conjunto de coordenadas, que permite obtener la posicion del TCP a lo largo del desplazamiento mas la orientacion del sistema de referencia vinculado al TCP, y un conjunto de angulos, que permiten describir la inclinacion relativa de la herramienta respecto del sistema de referencia antes indicado a lo largo del desplazamiento.

En todos los casos descritos a continuacion, el conjunto de angulos que definiran la inclinacion de la herramienta respecto del sistema de referencia vinculado al TCP, mencionados en el parrafo anterior, coincide con la pareja de angulos de Euler ψ , de precesión, y θ , de nutación. Seria factible introducir el angulo φ , o angulo de rotación propia, pero añade una complicacion adicional al proceso cuando el total de las herramientas consideradas en este trabajo tienen si-

metria axial completa, ademas de poder llegar a causar daños en la instalacion si se trata de una herramienta laser con guiado por fibra optica al rotar en exceso esta ultima accidentalmente.

Punto 3D

Definido por un unico punto $P(x_P, y_P, z_P)$ y con la orientacion de su sistema de referencia coincidente con la del sistema de referencia absoluto establecido para el sistema de posicionamiento. De modo general se utilizara para realizar desplazamientos a una region del espacio determinada a fin de permanecer en ella durante un tiempo determinado, utilizando una herramienta durante el periodo establecido para efectuar algun tipo de tratamiento, o bien se usaran para definir la posicion de entrada y/o salida de la herramienta.

Linea recta 3D

Definida por dos puntos $A(x_A, y_A, z_A)$ y $B(x_B, y_B, z_B)$. El vector unitario tangente viene dado por

$$\hat{\mathbf{T}} = \frac{\vec{\mathbf{AB}}}{|\mathbf{AB}|} = \cos \gamma \cos \beta \hat{\mathbf{i}} + \cos \gamma \sin \beta \hat{\mathbf{j}} + \sin \gamma \hat{\mathbf{k}}$$

donde β y γ son el rumbo y la elevación y vienen dados por

$$\beta = \arctan \left(\frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} \right)$$

$$\gamma = \arctan \left(\frac{z_B - z_A}{\sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2}} \right)$$

Considerando el caso particular descrito, si introducimos en este caso la limitacion de que la recta no sea vertical, debido tanto a los condicionantes de la herramienta como a la manera de definir el sistema de coordenadas y, puesto que en la mayoría de los casos además estara próxima a la horizontal, $\hat{\mathbf{T}}$ y $\hat{\mathbf{k}}$ no son paralelos y puede elegirse:

$$\hat{\mathbf{N}} = \frac{\hat{\mathbf{k}} \times \hat{\mathbf{T}}}{|\hat{\mathbf{k}} \times \hat{\mathbf{T}}|} = -\sin \beta \hat{\mathbf{i}} + \cos \beta \hat{\mathbf{j}}$$

y el vector binormal sería:

$$\hat{\mathbf{B}} = \hat{\mathbf{T}} \times \hat{\mathbf{N}} = -\sin \gamma \cos \beta \hat{\mathbf{i}} - \sin \gamma \sin \beta \hat{\mathbf{j}} + \cos \gamma \hat{\mathbf{k}}$$

Arco de circunferencia 3D

El arco de circunferencia está definido por los extremos $A(x_A, y_A, z_A)$, $C(x_C, y_C, z_C)$ y por un punto intermedio $B(x_B, y_B, z_B)$. El vector unitario normal al plano que contiene la circunferencia viene de dado por:

$$\hat{\mathbf{n}} = \frac{\vec{\mathbf{AB}} \times \vec{\mathbf{BC}}}{|\vec{\mathbf{AB}} \times \vec{\mathbf{BC}}|}$$

y su sentido corresponde según la ley de la mano derecha a recorrer el arco siguiendo el orden $A \rightarrow B \rightarrow C$.

El centro de la circunferencia G se encuentra en la intersección de las rectas normales a las cuerdas por su punto medio:

$$r_1(\lambda) = \vec{\mathbf{OA}} + \frac{1}{2}\vec{\mathbf{AB}} + \lambda \hat{\mathbf{n}} \times \vec{\mathbf{AB}}$$

$$r_2(\mu) = \vec{\mathbf{OB}} + \frac{1}{2}\vec{\mathbf{BC}} + \mu \hat{\mathbf{n}} \times \vec{\mathbf{BC}}$$

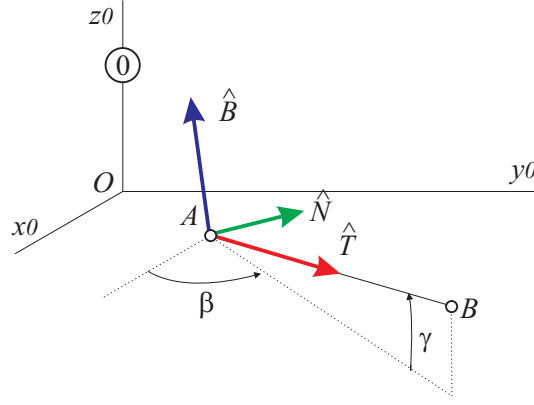


Figura 3.1: Triedro para una recta no vertical.

cuya solución es

$$\lambda = \frac{\vec{AC} \cdot \vec{BC}}{2 |\vec{AB} \times \vec{BC}|}$$

$$\mu = \frac{\vec{AC} \cdot \vec{AB}}{2 |\vec{AB} \times \vec{BC}|}$$

Con λ o μ se determina el centro de la circunferencia,

$$\vec{OG} = \vec{OA} + \frac{1}{2} \vec{AB} + \lambda \hat{n} \times \vec{AB}$$

y el radio de la circunferencia

$$R = \overline{AG} = \left| \frac{1}{2} \vec{AB} + \lambda \hat{n} \times \vec{AB} \right|$$

Para obtener el ángulo que corresponde al arco de la circunferencia, δ , hay que considerar dos casos dependiendo de si B se encuentra en el arco corto o en el arco largo. En el primer caso el ángulo α que forman \vec{AB} y \vec{BC} es menor que $\pi/2$ y en el segundo mayor que $\pi/2$. Entonces dependiendo del signo del coseno de α tenemos

$$\delta = \begin{cases} \arccos \frac{\vec{GA} \cdot \vec{GC}}{R^2} & \text{si } \cos \alpha \geq 0 \\ 2\pi - \frac{\vec{GA} \cdot \vec{GC}}{R^2} & \text{si } \cos \alpha < 0 \end{cases}$$

donde el coseno de α viene dado por

$$\cos \alpha = \frac{\vec{AB} \cdot \vec{BC}}{AB \cdot BC}$$

Definimos una base $\{\hat{u}, \hat{v}, \hat{w}\}$ ortonormal orientada a derechas de la forma siguiente:

$$\hat{u} = \frac{1}{R} \vec{GA}$$

$$\hat{v} = \hat{n} \times \hat{u}$$

$$\hat{w} = \hat{n}$$

En esa base los puntos P de la circunferencia vendría dados por

$$\vec{OP} = \vec{OG} + R \cos \phi \hat{u} + R \sin \phi \hat{v}$$

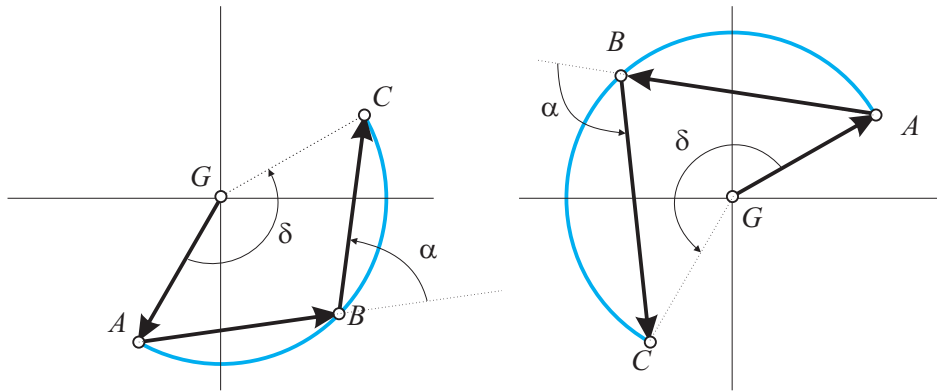


Figura 3.2: Ejemplos de arcos de circunferencia con $\cos \alpha > 0$ (izquierda) y $\cos \alpha < 0$ (derecha).

con $\phi \in [0, \delta]$. Derivando respecto del parámetro δ se obtiene los vectores del triedro que resultan ser:

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{T}} &= -\sin \phi \hat{\mathbf{u}} + \cos \phi \hat{\mathbf{u}} \\ \hat{\mathbf{N}} &= -\cos \phi \hat{\mathbf{u}} - \sin \phi \hat{\mathbf{u}} \\ \hat{\mathbf{B}} &= \hat{\mathbf{u}} = \hat{\mathbf{n}}\end{aligned}$$

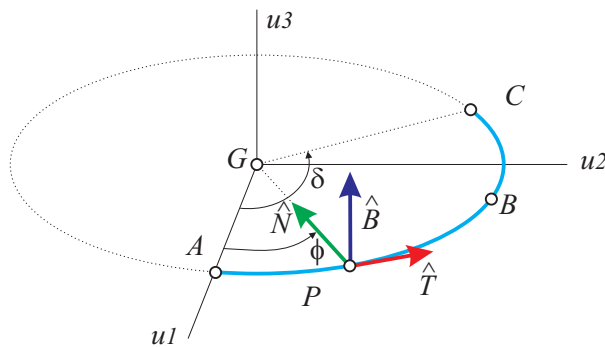


Figura 3.3: Triedro asociado con un arco de circunferencia.

3.2.2. Elementos auxiliares de union

Para recorrer trayectorias compuestas por mas de un elemento simple a velocidad constante y, por tanto, sin efectuar paradas intermedias entre ellos, es necesario unir dichos elementos, teniendo en cuenta que el origen de los sucesivos elementos a partir del primero dependen del punto final del elemento inicial, asi como las posibilidades de desplazamiento desde dichas ubicaciones.

Existen varias tipologias de unión que se gestionaran de diferente manera en función del sistema de desplazamiento empleada para recorrerlas, ya que algunos sistemas de desplazamiento disponibles en el mercado suavizan la union entre los elementos soportados para asegurar que se lleve a cabo una aproximacion de la trayectoria a velocidad constante:

- Union entre dos elementos de tipo linea recta 3D, la primera definida por los puntos $A(x_A, y_A, z_A)$ y $B(x_B, y_B, z_B)$, la segunda definida por los puntos $C(x_C, y_C, z_C)$ y $D(x_D, y_D, z_D)$, que comparten un punto en comun, $B(x_B, y_B, z_B) = C(x_C, y_C, z_C)$.

- Si las rectas fuesen paralelas y mantuviesen constante el valor de inclinacion de la herramienta en todos los puntos, el conjunto de lineas puede sustituirse por un unico elemento tipo linea recta definida por los puntos $A(x_A, y_A, z_A)$ y $D(x_D, y_D, z_D)$
- Si las rectas fuesen paralelas y no mantuviesen constante el valor de inclinacion de la herramienta en todos los puntos, dependiendo de las capacidades del sistema de desplazamiento, se podria indicar al mismo que modificase gradualmente el valor de inclinacion desde el valor inicial al valor final.

Si no estuviese disponible esta alternativa, habria que sustituir las dos lineas originales por una serie de elementos linea de menor tamaño que tuviesen pequeños cambios de inclinacion entre si, siendo necesario dividir la linea en tantos tramos como haga necesario la diferencia total de inclinaciones, la velocidad y aceleracion maxima permitida. Este calculo se resolvera utilizando metodos numericos.

El resultado optimo se obtendria minimizando el numero de estos segmentos auxiliares, ya que se consigue un numero inferior de comandos a procesar.

- Si las rectas no fuesen paralelas apareceria una esquina en el punto de union, lo cual imposibilita el recorrido a velocidad constante, puesto que implicaria el uso de valores de aceleracion infinitos. Dependiendo de las capacidades del sistema de desplazamiento, se podria indicar al mismo que suavizase el valor de esquina segun un valor de tolerancia definido.

Si no estuviese disponible esta alternativa, habria que sustituir las dos lineas originales por dos lineas de tamaño inferior unidas con un elemento arco, cuyo radio vendra determinado por la velocidad y aceleraciones maximas del sistema. Para calcular los puntos que definen dicho arco, basta generar las paralelas que permiten calcular el angulo circunscrito a las lineas originales en el plano auxiliar que las contiene, obteniendose en el punto de corte de dichas paralelas el centro del arco, luego el nuevo punto final de la linea inicial original, que coincide con el inicial del arco, se determina a partir del corte de la perpendicular a dicha linea con ella misma trazada desde el centro del arco, el punto central del arco coincide con el punto de corte del arco con la bisectriz de las lineas originales, y el nuevo punto inicial de la linea final original, que coincide con el final del arco, se determina nuevamente a partir del corte de la perpendicular a dicha linea con ella misma trazada desde el centro del arco, en las nuevas lineas el punto inicial de la linea inicial original coincide con el punto inicial de la nueva linea inicial, y el final de la linea final original con el final de la nueva linea final. Una vez calculados los puntos en el plano que contiene las lineas, es necesario efectuar la transformacion inversa para obtener sus valores en el sistema de referencia asociado al TCP.

En caso de que existiese un cambio de inclinacion de la herramienta a lo largo del desplazamiento, el procedimiento a emplear con los nuevos elementos seria equivalente al descrito para el caso correspondiente a la union de arco y linea coplanarios, existiendo dos uniones sucesivas.

- Union entre un elemento de tipo linea recta 3D, definida por los puntos $A(x_A, y_A, z_A)$ y $B(x_B, y_B, z_B)$, y un elemento tipo arco de circunferencia 3D, definido por los puntos $C(x_C, y_C, z_C)$, $D(x_D, y_D, z_D)$ y $E(x_E, y_E, z_E)$, compartiendo ambos un punto en comun, siendo el punto comun $B(x_B, y_B, z_B) = C(x_C, y_C, z_C)$ si la recta fuese el elemento inicial, o bien, $E(x_E, y_E, z_E) = A(x_A, y_A, z_A)$ si lo fuese el arco.
- Si la recta y el arco fuesen coplanarios, la tangente del arco en el punto comun coincide en direccion y sentido con el vector \vec{AB} y no existe cambio de inclinacion

de la herramienta a lo largo del desplazamiento, no es necesario realizar ningun tipo de calculo adicional.

- Si la recta y el arco fuesen coplanarios, la tangente del arco en el punto comun coincide en direccion y sentido con el vector \vec{AB} pero existe cambio de inclinacion de la herramienta a lo largo de la trayectoria, dependiendo de las capacidades del sistema de desplazamiento, se podria indicar al mismo que modificase gradualmente el valor de inclinacion desde el valor inicial al valor final.

Si no estuviese disponible esta alternativa, habria que sustituir la linea y el arco originales por una serie de elementos linea y arco de menor tamaño que tuviesen pequeños cambios de inclinacion entre si, siendo necesario dividir la linea y el arco en tantos tramos como haga necesario la diferencia total de inclinaciones, la velocidad y aceleracion maxima permitida. Este calculo se resolvera utilizando metodos numericos.

Al igual que en el caso de las rectas, el resultado optimo se obtendria minimizando el numero de estos elementos de menor tamaño, ya que se consigue un numero inferior de comandos a procesar.

- Si la recta y el arco fuesen coplanarios pero la tangente del arco en el punto comun no coincide en direccion y sentido con el vector \vec{AB} , apareceria una esquina en el punto de union, lo cual imposibilita el recorrido a velocidad constante, puesto que implicaria el uso de valores de aceleracion infinitos. Dependiendo de las capacidades del sistema de desplazamiento, se podria indicar al mismo que suavizase el valor de esquina segun un valor de tolerancia definido.

Si no estuviese disponible esta alternativa, habria que sustituir la linea y arco originales por una linea y arco de tamaños inferiores unidos con un elemento arco, cuyo radio vendra determinado por la velocidad y aceleraciones maximas del sistema. Para calcular los puntos que definen dicho arco auxiliar, basta generar las paralelas de la linea y las circunferencias concentricas del arco. Una vez definidas, se determinara el arco auxiliar de union teniendo en cuenta que el punto de corte entre una de las circunferencias concentricas y una de las paralelas describira el centro de dicho arco, obteniendose los dos puntos de inicio y fin trazando una perpendicular a la linea paralela que cortara a la linea original en el punto de inicio/fin del arco auxiliar y trazando una linea que una el centro del arco auxiliar con el centro del arco original que cortara a este ultimo arco en el punto de fin/inicio del arco auxiliar.

En caso de que existiese un cambio de inclinacion de la herramienta a lo largo del desplazamiento, el procedimiento a emplear con los nuevos elementos seria equivalente al descrito para el caso correspondiente a la union de arco y linea coplanarios, y a la union de dos arcos coplanarios.

- Si la recta y el arco no fuesen coplanarios, apareceria una esquina en el punto de union, lo cual imposibilita el recorrido a velocidad constante, puesto que implicaria el uso de valores de aceleracion infinitos. Dependiendo de las capacidades del sistema de desplazamiento, se podria indicar al mismo que suavizase el valor de esquina segun un valor de tolerancia definido.

Si no estuviese disponible esta alternativa, habria que sustituir la linea y arco originales por una linea y arco de tamaños inferiores unidos con uno o mas elementos arco, cuyo radio r vendra determinado por la velocidad y aceleraciones maximas del sistema. Para calcular los puntos que definen dicho conjunto de arcos se empleara una aproximacion basada en metodos numericos.

- Union entre un elemento de tipo arco de circunferencia 3D, definida por los puntos

$A(x_A, y_A, z_A)$, $B(x_B, y_B, z_B)$ y $C(x_C, y_C, z_C)$, y un elemento tipo arco de circunferencia 3D, definido por los puntos $D(x_D, y_D, z_D)$, $E(x_E, y_E, z_E)$ y $F(x_F, y_F, z_F)$, compartiendo ambos un punto en comun, siendo el punto comun $C(x_C, y_C, z_C) = D(x_D, y_D, z_D)$, o bien, $F(x_F, y_F, z_F) = A(x_A, y_A, z_A)$.

- Si los arcos fuesen coplanarios, la tangente del arco en el punto comun coincide en direccion y sentido con la tangente del otro arco en dicho punto y no existe cambio de inclinacion de la herramienta a lo largo del desplazamiento, no es necesario realizar ningun tipo de calculo adicional.
- Si los arcos fuesen coplanarios, la tangente del arco en el punto comun coincide en direccion y sentido con la tangente del otro arco en dicho punto pero existe cambio de inclinacion de la herramienta a lo largo de la trayectoria, dependiendo de las capacidades del sistema de desplazamiento, se podria indicar al mismo que modificase gradualmente el valor de inclinacion desde el valor inicial al valor final.

Si no estuviese disponible esta alternativa, habria que sustituir los arcos originales por una serie de elementos arco de menor tamaño que tuviesen pequeños cambios de inclinacion entre si, siendo necesario dividir los arcos en tantos tramos como haga necesario la diferencia total de inclinaciones, la velocidad y aceleracion maxima permitida. Este calculo se resolvera utilizando metodos numericos.

Al igual que en el caso de las rectas, el resultado optimo se obtendria minimizando el numero de estos elementos de menor tamaño, ya que se consigue un numero inferior de comandos a procesar.

- Si los arcos fuesen coplanarios pero la tangente del arco en el punto comun no coincide en direccion y sentido con la tangente del otro arco, apareceria una esquina en el punto de union, lo cual imposibilita el recorrido a velocidad constante, puesto que implicaria el uso de valores de aceleracion infinitos. Dependiendo de las capacidades del sistema de desplazamiento, se podria indicar al mismo que suavizase el valor de esquina segun un valor de tolerancia definido.

Si no estuviese disponible esta alternativa, habria que sustituir los arcos originales por arcos de tamaño inferior unidos con un elemento arco auxiliar, cuyo radio vendra determinado por la velocidad y aceleraciones maximas del sistema. Para calcular los puntos que definen dicho arco, basta generar las circunferencias concentricas de cada arco. Una vez definidas, se determinara el arco auxiliar de union teniendo en cuenta que el punto de corte entre dos de las circunferencias concentricas definira el centro de dicho arco, obteniendose los dos puntos de inicio y fin trazando las lineas que unen el centro del arco auxiliar con el centro de cada uno de los arcos originales, dichas lineas cortaran los arcos que las originan en el punto de fin/inicio del arco auxiliar.

En caso de que existiese un cambio de inclinacion de la herramienta a lo largo del desplazamiento, el procedimiento a emplear con los nuevos elementos seria equivalente al descrito para el caso correspondiente a la union de dos arcos coplanarios, existiendo dos uniones sucesivas.

- Si los arcos no fuesen coplanarios, apareceria una esquina en el punto de union, lo cual imposibilita el recorrido a velocidad constante, puesto que implicaria el uso de valores de aceleracion infinitos. Dependiendo de las capacidades del sistema de desplazamiento, se podria indicar al mismo que suavizase el valor de esquina segun un valor de tolerancia definido.

Si no estuviese disponible esta alternativa, habria que sustituir la linea y arco originales por una linea y arco de tamaños inferiores unidos con dos o mas elementos

arco, cuyo radio r vendra determinado por la velocidad y aceleraciones maximas del sistema. Para calcular los puntos que definen dicho conjunto de arcos se empleara una aproximacion basada en metodos numericos.

3.2.3. Curvas complejas

Debido a las limitaciones propias de los sistemas de traslacion en lo referente a la falta de existencia de comandos adecuados para representar multiples tipos de curvas, se hace necesario convertir las trayectorias tridimensionales en una serie concatenada de elementos simples, esto es lineas rectas y arcos. Se tomara como criterio que la diferencia entre las pendientes de dos elementos consecutivos sea mas pequena que la precision del sistema de desplazamiento. En general, no existen problemas de continuidad en lo referente a la pendiente cuando se van a tratar arcos y lineas, pero no es asi cuando se trata de curvas mas complejas. A continuacion se describe un algoritmo de que permite simplificar curvas bidimensionales, en concreto Bezier, elipses y splines. Estas curvas son de especial interes porque son utilizadas con mucha frecuencia en gran parte de los formatos vectoriales. Mas adelante se describe brevemente el procedimiento que permite extrapolar los resultados a un entorno tridimensional.

Curva de Bezier

Este tipo de curvas se pueden definir como un caso particular de curvas spline descritas mediante polinomios de Bernstein. Es posible representarlas empleando la siguiente ecuacion parametrica:

$$\vec{C}(t) = \sum_{i=0}^k \binom{k}{i} \vec{P}_i (1-t)^{k-i} t^i, \quad t \in [0, 1]. \quad (3.3)$$

La curva de Bezier de tercer orden $k = 3$ o Bezier cubica es una curva plana definida por cuatro puntos, \vec{P}_0 , \vec{P}_1 , \vec{P}_2 y \vec{P}_3 , relacionados del modo siguiente:

$$\begin{aligned} \vec{C}(t) = & \vec{P}_0(1-t)^3 + 3\vec{P}_1(1-t)^2t \\ & + 3\vec{P}_2(1-t)t^2 + \vec{P}_3t^3, t \in [0, 1]. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Partiendo de la ecuacion (3.4) se puede demostrar que la pendiente de la curva en el primer punto de la misma \vec{P}_0 , es paralela a la linea recta que contiene el propio punto y el mas proximo, \vec{P}_0 y \vec{P}_1 en este caso. En relacion a la pendiente de la curva en el punto final de la misma \vec{P}_3 , es de nuevo, paralela a la linea recta que contiene el propio punto y el mas proximo, \vec{P}_2 y \vec{P}_3 en este caso.

Debido a que la Bezier cubica ha sido y es ampliamente utilizada en formatos de CAD, se ha buscado un criterio que permita su aproximacion mediante elementos simples. Si es necesario realizar la aproximacion de una Bezier de mayor orden, basta reducirla a un conjunto de Bezier cubicas y aproximar cada uno de los elementos de dicho conjunto. Se indican a continuacion los casos mas simples en que las Bezier cubicas pueden ser empleadas para representar a otros elementos:

- Las lineas rectas pueden ser representadas como un caso particular de Bezier cubica, simplemente haciendo que $\vec{P}_0 = \vec{P}_1$ y $\vec{P}_2 = \vec{P}_3$.
- Las Bezier de orden $k = 2$ tambien pueden ser representadas como Bezier cubicas, simplemente haciendo que $\vec{P}_1 = \vec{P}_2$.

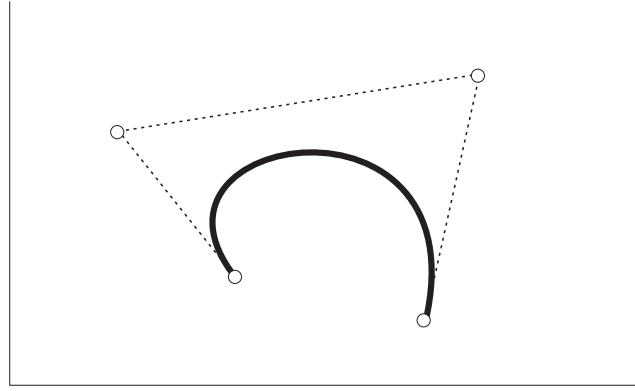


Figura 3.4: Ejemplo de Bezier cubica

- Las Beziers de orden superior pueden ser obtenidas uniendo conjuntos de curvas descritas con cuatro puntos. Para que la continuidad se mantenga es necesario que se cumpla que el ultimo punto de la curva anterior, \vec{P}_{A3} , y el primer punto de la curva siguiente \vec{P}_{B0} sean coincidentes $\vec{P}_{A3} = \vec{P}_{B0}$. Para mantener los criterios que debe cumplir una curva de Bezier, es igualmente necesario que exista continuidad en la pendiente, los puntos \vec{P}_{A2} , \vec{P}_{A3} , \vec{P}_{B0} y \vec{P}_{B1} deben ser colineales.

Estas curvas se han elegido para simplificar el resto de curvas complejas descritas en el presente trabajo, debido a que, de modo general, el conjunto de calculos relacionados con las Beziers cubicas es sencillo y debido a sus propiedades resultan adecuadas para la resolucion del problema. Son ademas curvas con cambios suaves de pendiente debido a la continuidad de la derivada segunda en los nodos. Adicionalmente, si un nodo de una Bezier sufre cambios, el efecto en la curva decrece de modo exponencial a la distancia. Se puede encontrar informacion adicional acerca de las Beziers y sus ventajas frente a otras curvas de tipo spline en [21].

Conversion de Bezier a arcos de circunferencia

Es posible aproximar una Bezier cubica mediante un conjunto de arcos de circunferencia de diversos modos (Ver [41]). Se muestra a continuacion la metodologia seleccionada con una breve explicacion de la misma.

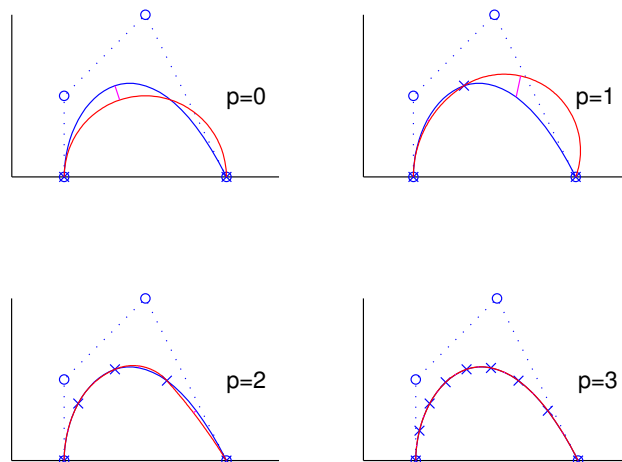


Figura 3.5: Aproximacion de una Bezier cubica usando arcos circulares. Se muestran los pasos $p = 0, 1, 2$ and 3 .

El metodo seleccionado se basa en efectuar divisiones del parametro de la Bezier $t \in [0, 1]$ de modo continuo, lo que permite obtener un conjunto de arcos $\{\vec{C}_0, \vec{C}_1, \dots\}$ que coincide con cada tramo de la Bezier $\vec{B}(t)$, manteniendose continuas las derivadas. La pendiente del arco inicial coincidira con la pendiente de la Bezier original en el mismo punto. Para el paso $p + 1$, el conjunto de valores t para cada uno de los cortes sera:

$$t_j = \frac{j}{2^p}, j = 0, 1, \dots, 2^p \quad (3.5)$$

y los arcos obtenidos tendran la forma siguiente:

$$\begin{aligned} \vec{C}_j(t_j) &= \vec{B}(t_j), \quad j = 0, \dots, 2^p - 1 \\ \vec{C}_j(t_{j+1}) &= \vec{B}(t_{j+1}), \quad j = 0, \dots, 2^p - 1 \\ \vec{C}'_j(t_{j+1}) &= \vec{C}'_{j+1}(t_{j+1}), \quad j = 0, \dots, 2^p - 1 \\ \vec{C}'_0(t_0) &= \vec{B}'(t_0). \end{aligned} \quad (3.6)$$

Para seleccionar el numero de pasos necesarios que permiten dar por concluida la aproximacion, se empleara como criterio de convergencia que la distancia entre el centro del arco y el centro del tramo de Bezier que corresponde al corte que ha generado el arco, no supere un valor maximo previamente definido. A medida que el numero de pasos p aumenta, la distancia entre los arcos se reduce y, al mismo tiempo, mejora la aproximacion del conjunto en relacion a la pendiente de la curva.

La diferencia entre la pendiente de la Bezier y el arco correspondiente puede ser usado tambien como criterio de convergencia. Sin embargo, tiende a generar peores resultados que el anteriormente descrito.

Arco de elipse

Existen multiples metodos para definir arcos de elipse. Uno de ellos pasa por definir primero la elipse completa, indicando su centro (x_C, y_C) y la longitud de los semiejes y su orientacion. Para describir el arco, se definiran el angulo inicial θ_b , angulo final θ_e y el sentido de desplazamiento. A partir de estos parametros, es posible obtener las coordenadas del punto inicial (x_b, y_b) y final (x_e, y_e) del arco de elipse, la proporcion de la curva cubierta por el movimiento, las pendientes de la curva en los angulos inicial y final del arco, etc.

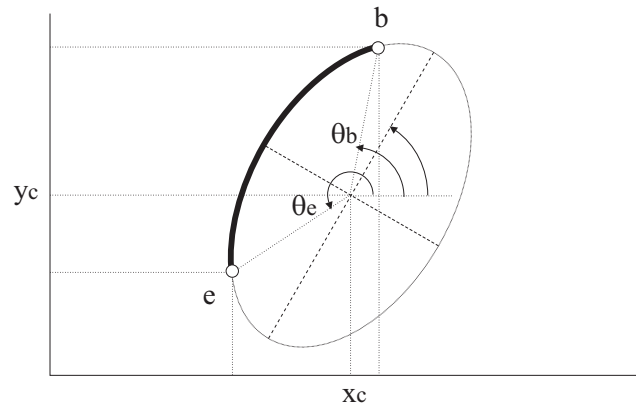


Figura 3.6: Arco de elipse.

Conversion de arcos de elipse a Beziers

Se han descrito varios metodos para aproximar una elipse (Ver [35]). El metodo seleccionado se basa en dividir la elipse en sus cuatro cuadrantes y aproximar cada uno de ellos por separado. Tanto los arcos de elipse que cubren el cuadrante completamente, como aquellos que no lo hacen, se aproximarán mediante una Bezier cubica $\{\vec{B}_i, i = 1, \dots, 3\}$ que se calculara teniendo en cuenta que los valores de las dos primeras derivadas y la curvatura serán iguales en el punto inicial y final. El primer punto y el ultimo punto del arco de la elipse se correspondera con los puntos de la Bezier \vec{B}_0 y \vec{B}_3 respectivamente. Los puntos \vec{B}_1 y \vec{B}_2 están contenidos en las tangentes al punto inicial y final del arco, y localizados a una distancia, relacionada con el punto de interseccion de las tangentes $\vec{C}(x_C, y_C)$, los valores de curvatura κ_1 y κ_2 en el primer y ultimo punto del arco, así como con las pendientes m_1 y m_2 de las tangentes. Es posible probar que la distancia de los puntos contenidos en las tangentes será proporcional a dos parametros, λ y μ , que pueden ser calculados del modo siguiente: proportional to two parameters, λ and μ , and they can be calculated according to the following steps:

- Se calcularan las constantes C_1 y C_2 :

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{3\kappa_1 x_{B_0} |x_{B_0}| (1 + m_1^2)^{\frac{3}{2}}}{2x_{B_3}(m_1 - m_2)} \\ C_2 &= \frac{3\kappa_2 x_{B_3} |x_{B_3}| (1 + m_2^2)^{\frac{3}{2}}}{2x_{B_0}(m_1 - m_2)}. \end{aligned} \quad (3.7)$$

- El parametro λ se calculara hallando la raiz cuadrada del polinomio siguiente, teniendo en cuenta que su valor variara entre 0 y 1:

$$f(\lambda) = 1 - \lambda - C_2(1 - C_1\lambda^2)^2 \quad (3.8)$$

- El parametro μ se calculara sustituyendo λ en la ecuacion siguiente:

$$\mu = 1 - C_1\lambda^2 \quad (3.9)$$

- Finalmente, es posible obtener los puntos de la Bezier B_1 y B_2 como se indica a continuacion:

$$\begin{aligned} x_{B_1} &= x_{B_0} + \lambda(x_C - x_{B_0}); \\ y_{B_1} &= y_{B_0} + m_1(x_{B_1} - x_{B_0}); \\ x_{B_2} &= x_{B_3} + \mu(x_C - x_{B_3}); \\ y_{B_2} &= y_{B_3} + m_2(x_{B_2} - x_{B_3}); \end{aligned} \quad (3.10)$$

Curva spline

Una funcion S es una spline en el intervalo, $[a, b]$, si existe una particion en dicho intervalo $\Delta = \{a = t_0 < t_1 < \dots < t_n = b\}$ tal que S es un polinomio en $[t_i, t_{i+1}]$, $i = 0, 1, \dots, n - 1$.

Sin embargo, algunos autores consideran que la spline es solo un caso particular de las funciones definidas en el parrafo anterior, considerandolas funciones polinomicas definidas por trozos.

Las funciones que describen las splines cubicas están descritas por polinomios de orden $k = 4$. Las mas utilizadas son las de tipo 2, es decir, aquellas que cumplen la condicion de continuidad de la derivada segunda en los nodos, porque aseguran un cambio suave de curvatura

a lo largo de toda la funcion, sin necesidad de emplear polinomios mas complejos, esto es, de mayor grado.

En el espacio lineal formado por las splines de orden k hay un conjunto de ellas que se emplea habitualmente como base de dicho espacio. Estas curvas reciben el nombre de B-splines y tienen ciertas propiedades que las hacen especiales frente al resto de splines. Se indican a continuacion dichas propiedades:

1. $B_i(x) = 0$ si $x \notin [t_i, t_{i+k}]$. Como consecuencia de ello, solo existen k B-splines en el rango particular $[t_j, t_{j+1}]$, concretamente, $B_{j-k+1}, B_{j-k+2}, \dots, B_j$.
2. $\sum_i B_i(x) = \sum_{i=r-k+1}^{s-1} B_i(x) = 1 \quad \forall (t_r < x < t_s)$.
3. $B_i(x) > 0$ si $t_i < x < t_{i+k}$.
4. Sea una spline de orden k con vector de nodos t , entonces esta podra ser descrita empleando una combinacion de B-splines

$$s_{k,t} = \sum_i \alpha_i B_{i,k,t}. \quad (3.11)$$

5. Siendo este el caso, se debera cumplir el conjunto de criterios que se muestra a continuacion

$$B_{i,1}(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } t_i \leq x < t_{i+1} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

$$B_{i,k}(x) = \frac{x - t_i}{t_{i+k+1} - t_i} B_{i,k-1}(x) + \frac{t_{i+k} - x}{t_{i+k} - t_{i+1}} B_{i+1,k-1}(x). \quad (3.12)$$

Tomando como ejemplo el intervalo $[0, 1]$.

Se tendra que, tomando como vector de nodos $\{t_0 = 0, t_1 = 1\}$, una spline unica de orden $k = 1$, coincidiendo esta con la funcion de paso (1 si $t \in [0, 1]$, 0 en otro caso).

Si $k = 2$ y se toma como vector de nodos $\{t_0 = t_1 = 0, t_2 = t_3 = 1\}$, dara lugar a dos lineas rectas

Si $k = 3$ y se toma como vector de nodos $\{t_0 = t_1 = t_2 = 0, t_3 = t_4 = t_5 = 1\}$, dara lugar a tres funciones de tipo parabolico

Finalmente, si $k = 4$ y se toma como vector de nodos $\{t_0 = \dots = t_3 = 0, t_4 = \dots = t_7 = 1\}$, dara lugar a cuatro funciones de tipo cubico.

Una curva B-spline se formara a partir de un conjunto de puntos de control $\{\vec{P}_0, \vec{P}_1, \dots, \vec{P}_n\}$ y un vector de nodos $\{t_0 \leq t_1 \leq \dots \leq t_m\}$ de largo $m + 1$ en orden decreciente. La curva vendra dada por una ecuacion como la siguiente:

$$\vec{C}(t) = \sum_{i=0}^n \vec{P}_i B_{i,k}(t) \quad (3.13)$$

siendo $m = n + k + 1$ y $k = 4$ si se trata de una spline cubica.

Para mayor informacion en relacion con las splines, es posible consultar la fuente [7]

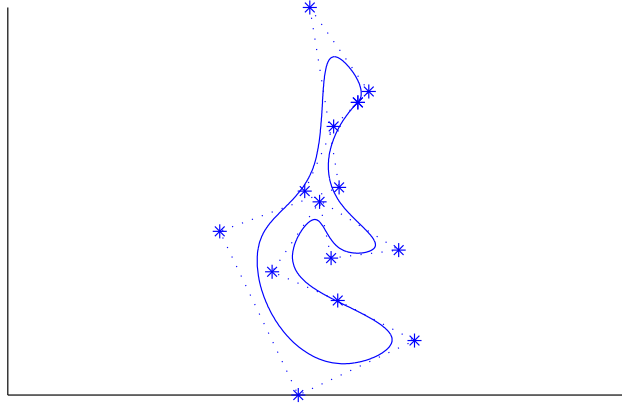


Figura 3.7: Example of cubic spline.

Conversion de splines a Beziers

A continuacion se explica la conversion de splines a Beziers paso a paso:

- La spline cubica mas sencilla consta de cuatro puntos de control $\{\vec{P}_0, \vec{P}_1, \vec{P}_2, \vec{P}_3\}$ y un vector de nodos de longitud ocho, a saber, $\{t_0 = t_1 = t_2 = t_3 = a, t_4 = t_5 = t_6 = t_7 = b\}$. Esta spline es igual a la Bezier que vendria definida por los mismos cuatro puntos de control.
- La spline con cinco puntos de control $\{\vec{P}_0, \vec{P}_1, \dots, \vec{P}_4\}$ y un vector de nodos de longitud nueve, a saber, $\{t_0 = t_1 = t_2 = t_3 = a, t_4, t_5 = t_6 = t_7 = b\}$ puede reducirse a dos Beziers concatenadas que se definiran mediante siete puntos $\{\vec{B}_0, \vec{B}_1, \dots, \vec{B}_6\}$, con $\vec{B}_0 = \vec{P}_0$, $\vec{B}_1 = \vec{P}_1$, $\vec{B}_5 = \vec{P}_3$ y $\vec{B}_6 = \vec{P}_4$. El resto de puntos vendra dado por:

$$\begin{aligned}\vec{B}_2 &= \frac{t_5 - t_4}{t_5 - t_3} \vec{P}_1 + \frac{t_4 - t_3}{t_5 - t_3} \vec{P}_2 \\ \vec{B}_4 &= \frac{t_5 - t_4}{t_5 - t_3} \vec{P}_2 + \frac{t_4 - t_3}{t_5 - t_3} \vec{P}_3 \\ \vec{B}_3 &= \frac{t_5 - t_4}{t_5 - t_3} \vec{B}_2 + \frac{t_4 - t_3}{t_5 - t_3} \vec{B}_4.\end{aligned}\tag{3.14}$$

- La spline con seis puntos de control $\{\vec{P}_0, \vec{P}_1, \dots, \vec{P}_5\}$ y un vector de nodos de longitud diez, a saber, $\{t_0 = t_1 = t_2 = t_3 = a, t_4, t_5, t_6 = t_7 = t_8 = b\}$ puede reducirse a tres Beziers concatenadas que seran definidas por diez puntos $\{\vec{B}_0, \vec{B}_1, \dots, \vec{B}_9\}$. Los dos primeros puntos y los dos ultimos puntos son iguales a los puntos de la spline $\vec{B}_0 = \vec{P}_0$, $\vec{B}_1 = \vec{P}_1$, $\vec{B}_8 = \vec{P}_4$ y $\vec{B}_9 = \vec{P}_5$. Los puntos adyacentes vendran dados por:

$$\begin{aligned}\vec{B}_2 &= \frac{t_5 - t_4}{t_5 - t_3} \vec{P}_1 + \frac{t_4 - t_3}{t_5 - t_3} \vec{P}_2 \\ \vec{B}_7 &= \frac{t_5 - t_4}{t_5 - t_3} \vec{P}_3 + \frac{t_4 - t_3}{t_5 - t_3} \vec{P}_4,\end{aligned}\tag{3.15}$$

los puntos centrales vendran dados por:

$$\begin{aligned}\vec{B}_4 &= \frac{t_6 - t_4}{t_6 - t_3} \vec{P}_2 + \frac{t_4 - t_3}{t_6 - t_3} \vec{P}_3 \\ \vec{B}_5 &= \frac{t_6 - t_5}{t_6 - t_3} \vec{P}_2 + \frac{t_5 - t_3}{t_6 - t_3} \vec{P}_3\end{aligned}\tag{3.16}$$

y, finalmente, los puntos de union de las Beziers:

$$\begin{aligned}\vec{B}_3 &= \frac{t_5 - t_4}{t_5 - t_3} \vec{B}_2 + \frac{t_4 - t_3}{t_5 - t_3} \vec{B}_4 \\ \vec{B}_6 &= \frac{t_6 - t_5}{t_6 - t_4} \vec{B}_5 + \frac{t_5 - t_4}{t_6 - t_4} \vec{B}_7.\end{aligned}\tag{3.17}$$

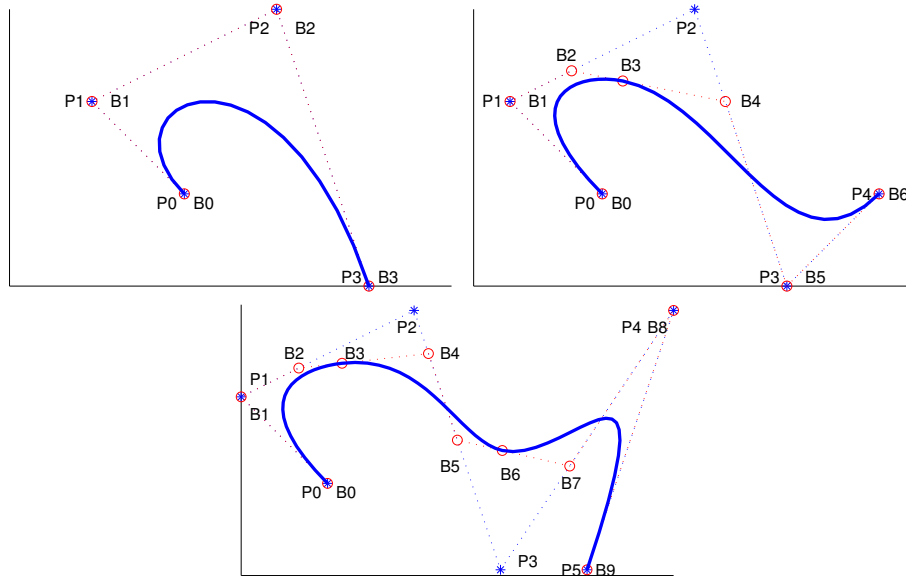


Figura 3.8: Splines de 4, 5 y 6 puntos de control

- Si el numero de puntos de control en la curva es mayor que seis, el procedimiento de calculo es equivalente a los casos previos. En el caso de tener una spline cubica con $n + 1$ puntos de control, existira un vector de nodos de longitud $m = n + 4$ y sera posible reducir o simplificar la curva a $n_b = n - 2$ Beziers con $n_{pb} = 3n_b + 1$ puntos. Los dos primeros puntos, asi como los dos ultimos, seran iguales a los puntos de la spline. Empleando esas parejas de puntos y siendo conocidas las propiedades de las curvas, es posible calcular los puntos interiores de modo analogo al caso previo.

Extrapolacion de curvas complejas al espacio tridimensional

Una vez descritas las soluciones que permiten la aproximacion de curvas mediante arcos en un espacio bidimensional, se puede proceder a extrapolar los resultados al espacio tridimensional. El procedimiento de conversion sera el siguiente:

- La curva o conjunto de curvas a representar en el espacio tridimensional deben estar contenidas en un unico plano. Si no fuese asi, habria que desagrupar las curvas, creando diferentes conjuntos de elementos de la trayectoria, tratando cada uno de ellos por separado como se indica en este procedimiento, incluso seccionando las curvas si fuese el caso y si fuese posible convertirlas en alguna de las descritas, uniendo a posteriori los conjuntos de arcos como se indica en 3.2.2. En el caso de que fuese imposible, en lugar de este metodo, se emplearia la aproximacion descrita en 3.2.4.
- Se efectuara la transformacion de coordenadas, tal que permita definir la curva o conjunto de curvas concatenadas en un plano auxiliar, de modo que los puntos puedan ser tratados, teniendo en cuenta que el valor en el eje Z' del plano auxiliar supone que todos ellos tendran coordenada $z'_i = 0$

- Se aplicara el procedimiento descrito para efectuar la conversion de curvas complejas a elementos simples tipo arco de circunferencia.
- Se calcularan los puntos centrales de cada uno de los arcos obtenidos en el proceso anterior, quedando definido cada uno de ellos por tres puntos, siendo al menos uno de ellos compartido con otro arco.
- Se efectuara la transformacion inversa de coordenadas, de modo que los arcos descritos utilizando tres puntos se puedan definir en el sistema de referencia absoluto del sistema de traslacion. Una vez obtenidas sus coordenadas, es inmediata su transformacion en elementos simples de trayectoria del tipo arco de circunferencia 3D, como se ha descrito en 3.2.1.

3.2.4. Trayectoria a partir de secuencia de puntos 3D libres

Existe otro caso que resulta interesante considerar por tratarse de un problema habitual en produccion, el paso a traves de una secuencia de puntos tridimensionales, en general pertenecientes a una superficie real compleja que no esta descrita mediante una ecuacion o serie de ellas. No se analizara el caso con un alto grado de detalle porque existen claras similitudes entre el procedimiento de obtencion de trayectorias para este caso y el descrito para obtener curvas complejas a traves de elementos simples, puesto que esta basado en las mismas premisas.

Adicionalmente, debido a las condiciones del proceso, es posible que sea necesario mantener la herramienta orientada en direccion perpendicular a la superficie en cada uno de los puntos. En este caso, es necesario no solo que cada uno de los puntos de la secuencia a recorrer venga definido por sus tres coordenadas espaciales, si no que cada uno de ellos tenga asociado un vector normal a la superficie, o bien, que sea posible su calculo a partir de las coordenadas de otros puntos proximos a los incluidos en la secuencia. Se parte ademas del supuesto de que la secuencia de puntos se ha tratado previamente para eliminar el posible ruido o desviaciones que pudiesen existir respecto de la superficie real.

Dado que el no orientar la herramienta de modo perpendicular a la superficie, empleando otro criterio como mantener la orientacion de la herramienta constante o vincularla de algun modo a los propios desplazamientos, no deja de ser un caso particular en que el vector asociado a los puntos no es dependiente de la superficie, se analizara unicamente el caso en que se conocen los vectores normales asociados a la superficie.

El procedimiento para transformar los puntos en una trayectoria que pueda ser recorrida a velocidad constante por el sistema de desplazamiento es el siguiente:

- Previamente se realizara un ajuste de los puntos a un polinomio de grado tal que permita asegurar que cada uno de los puntos se encuentra a una distancia de dicho polinomio inferior a un valor umbral. Este umbral vendra definido por las necesidades del proceso a realizar y los limites de precision del sistema de desplazamiento utilizado.
- Una vez obtenida la aproximación polinómica se aproximara a su vez por una sucesión de arcos que mantengan continua la derivada. Para ello la tangente inicial de un arco ha de coincidir con la tangente final del arco anterior, pudiendose calcular ambas a partir de la propia aproximación polinómica. El número de arcos a utilizar se determina imponiendo que la distancia entre los arcos y los puntos de la línea a recorrer cumpla que que las desviaciones cuadráticas medias sean inferiores a un valor limite dependiente del proceso.
- Una vez obtenida la secuencia de arcos, se modificara la posicion de la herramienta mediante sus parametros de inclinacion para cumplir el criterio de orientacion respecto de la superficie. Debido a que se pueden producir cambios en dicha orientacion a lo largo de un

desplazamiento realizado sobre un mismo arco, como se ha comentando anteriormente, dependiendo de las capacidades del sistema de desplazamiento, en algunos casos habra que subdividirlo en tramos de arco mas pequeños, a lo largo de los cuales se va cambiando gradualmente el valor de la inclinacion de la herramienta.

- Se calculara a partir de los elementos arco y valores de inclinacion de herramienta descritos, definidos por los valores umbrales anteriormente seleccionados, que es factible realizar el desplazamiento con la velocidad requerida y se cumplen las limitaciones fisicas del sistema de desplazamiento. En caso contrario, deberia incrementarse el valor de los umbrales, obteniendo en general un resultado con precision menor pero con requisitos de desplazamiento menos estrictos.

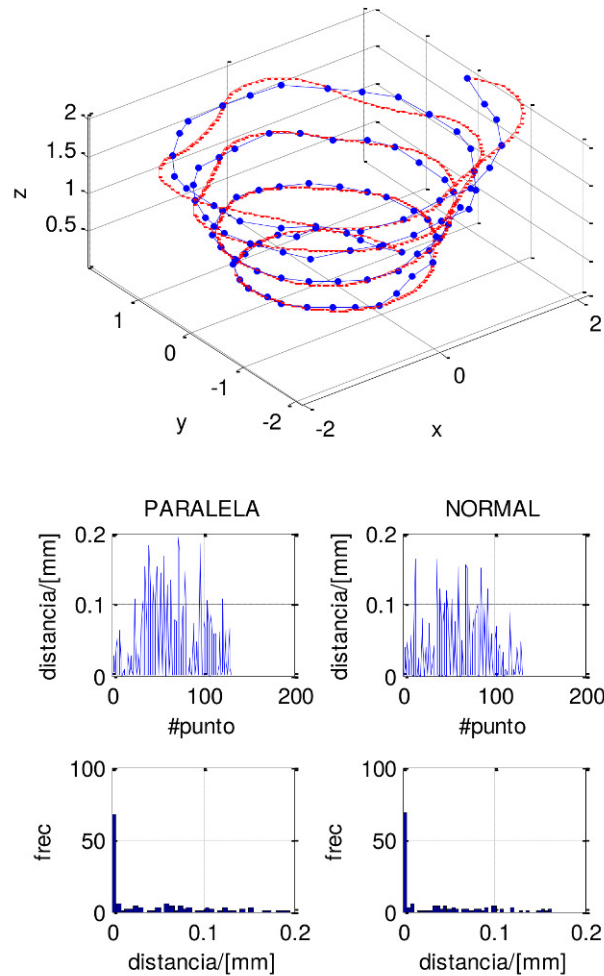


Figura 3.9: Ejemplo de secuencia de puntos que aproximan una helice, generados añadiendo ruido aleatorio, en que se aprecia las oscilaciones derivadas de la union de las tangentes al emplear valores umbrales elevados

Entendiendo que aqui se ha descrito simplemente la base del metodo de obtencion de modo general, a efectos ilustrativos se muestra un caso particular real en el capitulo dedicado a ejemplos posteriormente, basado en la generacion automatica de la trayectoria para recorrer una linea blanca marcada sobre la superficie de un alabe de turbina.

3.2.5. Acondicionamiento de tramos de inicio y fin de trayectoria

Como ya se ha explicado, las técnicas de procesamiento por laser requieren, en general, que la trayectoria se realice con un valor de velocidad constante para obtener resultados uniformes. Para conseguir que se cumpla dicha condicion, es necesario añadir tramos auxiliares de aceleracion y deceleracion al principio y al final de la trayectoria respectivamente. La funcion de estos tramos es permitir que la velocidad pueda incrementarse desde el reposo hasta que alcance el valor constante requerido en el preciso momento en que el TCP se encuentra recorriendo el primer punto de la trayectoria y viceversa para el ultimo punto.

Tanto el valor de velocidad constante que se pretende alcanzar como el valor de la aceleracion maxima permitida para el sistema de desplazamiento seran las variables necesarias para calcular la longitud minima de estos tramos auxiliares. Si hay tramos de la curva de tipo arco, ya sea por existir como elementos simples originalmente, ya sea por obtener un conjunto de ellos despues de simplificar un elemento complejo, el valor maximo permitido de velocidad que permite llevar a cabo la trayectoria vendra determinado por el radio del mas pequeño de los arcos y el maximo valor de aceleracion. La distancia de ambos tramos, aceleracion y deceleracion, es igual y puede calcularse como $s = v^2/2a$.

El primer punto de la trayectoria $P_b = (x_b, y_b, z_b)$, el ultimo punto de la trayectoria $P_e = (x_e, y_e, z_e)$ y las pendientes en cada uno de los puntos θ_b y θ_e respectivamente, son necesarios para definir la direccion y sentido de los tramos auxiliares. Una vez calculados, los tramos se añadiran a la trayectoria principal, conservando en todo momento la continuidad de la pendiente. Se tendra, por tanto, que el vector definido por el punto inicial y final del tramo de aceleracion debe tener la misma direccion y sentido que el vector tangente a la trayectoria en P_b y el vector definido por el punto inicial y final del tramo de deceleracion debe tener la misma direccion y sentido que el vector tangente a la trayectoria en P_e .

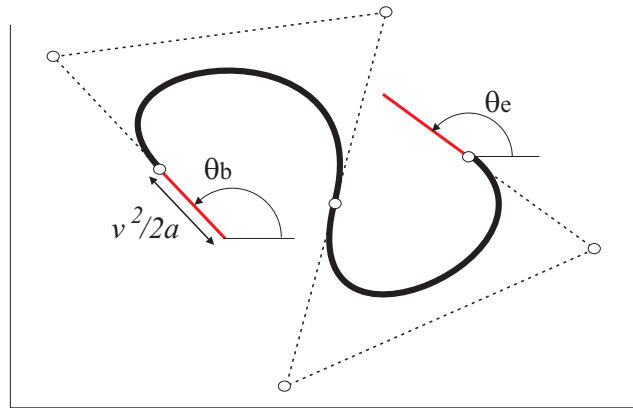


Figura 3.10: Auxiliar acceleration and deceleration paths.

Una vez definidos los tramos de aceleracion y deceleracion, el sistema debe ser programado para activar la herramienta cuando alcanza el punto P_b , permaneciendo esta activa hasta que llega al punto P_e .

Alternativamente, dependiendo de las circunstancias y de la naturaleza del tratamiento, podria ser adecuado establecer puntos previos de activacion antes de terminar de recorrer el tramo de aceleracion, a fin de realizar un aumento gradual de la accion de la herramienta, en general la potencia del laser, para evitar cambio brusco en las condiciones del material en la zona de tratamiento, al activar la herramienta y efectuar un apagado en rampa equivalente al llegar al tramo de deceleracion. Si este fuese el caso se podria optar por alargar los tramos de aceleracion y deceleracion a fin de comenzar la rampa con velocidad constante, o bien, calcular la

variacion de potencia teniendo en cuenta el cambio de velocidad, que sucede de modo uniforme, hasta alcanzar el valor establecido.

3.3. Almacenamiento de trayectorias

Una vez obtenidos todos los tramos de la trayectoria, y de modo previo a efectuar su conversion a ordenes del sistema de traslacion para llevar a cabo los desplazamientos descritos, se almacenaran empleando un formato propio, que se ha diseñado de modo que tenga las siguientes propiedades:

- Flexible: El objetivo es poder emplear las trayectorias definidas en el formato con diferentes tipos de sistemas de traslacion, de modo que se ha optado por efectuar el almacenamiento de los distintos elementos que definen la trayectoria de modo generico, incluyendo toda la informacion necesaria para poder efectuar la conversion de las mismas a comandos del sistema seleccionado para su realizacion y poder realizar el proceso deseado. Los ficheros, una vez creados, son ampliamente reutilizables, pudiendo cambiar los parametros de manera sencilla a traves de la interfaz de la aplicacion creada para probar la validez de la metodologia descrita en el presente trabajo.
- Sencillo: Se emplea texto plano y nombres intuitivos para los elementos de trayectoria, asi como para el resto de parametros necesarios para controlar los elementos auxiliares que sea posible controlar a la hora de realizar el tratamiento previsto, por lo que es facilmente editable incluso sin aplicaciones especificas para ello. El objetivo es permitir, tanto el uso asistido para trayectorias complejas, como el uso manual para los casos sencillos.
- Libre: Se ha empleado como base el lenguaje de etiquetas XML, de modo que tanto la visualizacion del formato, como su edicion y validacion pueden realizarse con multiples alternativas libres. En combinacion con el formato vectorial SVG, seria posible incluso representar graficamente las trayectorias en cualquier navegador que soporte dicha tecnologia.

Se incluye, solo a efectos ilustrativos, un ejemplo del XML generado para un caso sencillo, en el que se pueden observar distintos elementos de trayectoria y modos de trabajo, con control de lazo cerrado y abierto, uso de sistema de rotacion para posicionado de pieza, asi como la existencia de parametros que permiten modificar el modo en que interactuan los conjuntos de dichos elementos y los datos minimos del sistema de traslacion seleccionado que hagan posible la conversion a comandos del proceso completo descrito.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<Programa formato="rapid" proceso="cladding" ruta="/tmp">
  <Trayectoria ScanActive="no">
    <Herramienta nombre="precitec">
      <Procesos_validos>
        <proceso>cladding</proceso>
      </Procesos_validos>
      <TCP unidades="mm">
        <x>287.7</x>
        <y>0.0</y>
        <z>110.0</z>
        <q0>0.7071</q0>
        <q1>0.0</q1>
        <q2>-0.7071</q2>
        <q3>0.0</q3>
      </TCP>
      <Carga>
        <Masa unidades="kg">16.0</Masa>
        <CDG unidades="mm">
          <x>150.0</x>
```

```

        <y>0.0</y>
        <z>50.0</z>
        <q0>1.0</q0>
        <q1>0.0</q1>
        <q2>0.0</q2>
        <q3>0.0</q3>
    </CDG>
    <Momentos unidades="kgm^2">
        <Ix>0.06</Ix>
        <Iy>0.06</Iy>
        <Iz>0.06</Iz>
    </Momentos>
</Carga>
</Herramienta>
<CNC ejesExt="no" nombre="IRB2400L16">
    <AngulosDelta unidades="grados">
        <delta1>0.0</delta1>
        <delta2>90.0</delta2>
        <delta3>0.0</delta3>
        <delta4>0.0</delta4>
        <delta5>0.0</delta5>
        <delta6>0.0</delta6>
    </AngulosDelta>
    <DistanciasEjesX>
        <a1>100.0</a1>
        <a2>-705.0</a2>
        <a3>-135.0</a3>
        <a4>0.0</a4>
        <a5>0.0</a5>
        <a6>0.0</a6>
    </DistanciasEjesX>
    <DistanciasEjesZ>
        <d1>615.0</d1>
        <d2>0.0</d2>
        <d3>0.0</d3>
        <d4>755.0</d4>
        <d5>0.0</d5>
        <d6>85.0</d6>
    </DistanciasEjesZ>
    <AngulosEjes>
        <alpha1>-90.0</alpha1>
        <alpha2>0.0</alpha2>
        <alpha3>90.0</alpha3>
        <alpha4>-90.0</alpha4>
        <alpha5>90.0</alpha5>
        <alpha6>0.0</alpha6>
    </AngulosEjes>
    <AngulosMinimos>
        <alphamin1>-180.0</alphamin1>
        <alphamin2>-65.0</alphamin2>
        <alphamin3>-61.0</alphamin3>
        <alphamin4>-360.0</alphamin4>
        <alphamin5>-120.0</alphamin5>
        <alphamin6>-360.0</alphamin6>
    </AngulosMinimos>
    <AngulosMaximos>
        <alphamax1>180.0</alphamax1>
        <alphamax2>60.0</alphamax2>
        <alphamax3>64.0</alphamax3>
        <alphamax4>360.0</alphamax4>
        <alphamax5>120.0</alphamax5>
        <alphamax6>360.0</alphamax6>
    </AngulosMaximos>
</CNC>
<Desplazamiento control="no" extAxis="angle" final="si" tipo="linea3D" velCte="si" voff="150.0">
    <!--Punto inicial de la linea-->
    <Punto unidades="mm">
        <Orden>0</Orden>
        <x>-100.0</x>
        <y>100.0</y>
        <z>750.0</z>
    </Punto>
    <!--Punto final de la linea-->
    <Punto unidades="mm">
        <Orden>1</Orden>
        <x>100.0</x>

```

```

        <y>100.0</y>
        <z>750.0</z>
    </Punto>
    <!--Angulos de Euler aplicados a la herramienta-->
    <Theta unidades="grados">0.0</Theta>
    <Psi unidades="grados">0.0</Psi>
    <!--Potencia del laser-->
    <Potencia unidades="watts">0.0</Potencia>
    <!--Angulo de rotacion del eje 1-->
    <ThetaExt unidades="grados">0.0</ThetaExt>
    <!--Angulo de rotacion del eje 2-->
    <PsiExt unidades="grados">0.0</PsiExt>
    <!--Velocidad a la que se realizara el movimiento-->
    <Velocidad unidades="mm/s">10.0</Velocidad>
    <!--Aceleracion maxima permitida-->
    <Aceleracion unidades="mm/s^-1">20.0</Aceleracion>
    <ProgLaser unidades="entero">6</ProgLaser>
    <!--Voltajes de tolvas cladding-->
    <VTolvaA unidades="volt">0.0</VTolvaA>
    <VTolvaB unidades="volt">0.0</VTolvaB>
</Desplazamiento>
<Desplazamiento control="PID" extAxis="none" final="si" tipo="arc3D" velCte="si" voff="150.0">
    <!--Punto inicial del arco-->
    <Punto unidades="mm">
        <Orden>0</Orden>
        <x>0.0</x>
        <y>-100.0</y>
        <z>750.0</z>
    </Punto>
    <!--Punto medio del arco-->
    <Punto unidades="mm">
        <Orden>1</Orden>
        <x>-100.0</x>
        <y>0.0</y>
        <z>750.0</z>
    </Punto>
    <!--Punto final del arco-->
    <Punto unidades="mm">
        <Orden>2</Orden>
        <x>0.0</x>
        <y>100.0</y>
        <z>750.0</z>
    </Punto>
    <!--Angulos de Euler aplicados a la herramienta-->
    <Theta unidades="grados">0.0</Theta>
    <Psi unidades="grados">0.0</Psi>
    <Consigna unidades="volts">1.0</Consigna>
    <Control list="">
        <Range id0="0.0" />
        <Proporcional id0="10.0" />
        <Integral id0="0.1" />
        <Derivativo id0="2.35" />
    </Control>
    <!--Velocidad a la que se realizara el movimiento-->
    <Velocidad unidades="mm/s">10.0</Velocidad>
    <!--Aceleracion maxima permitida-->
    <Aceleracion unidades="mm/s^-1">20.0</Aceleracion>
    <ProgLaser unidades="entero">6</ProgLaser>
    <!--Voltajes de tolvas cladding-->
    <VTolvaA unidades="volt">0.0</VTolvaA>
    <VTolvaB unidades="volt">0.0</VTolvaB>
</Desplazamiento>
<Desplazamiento control="Adaptative PID" extAxis="none" final="no" tipo="punto3D" velCte="no" voff="150.0">
    <!--Punto -->
    <Punto unidades="mm">
        <Orden>0</Orden>
        <x>0.0</x>
        <y>0.0</y>
        <z>750.0</z>
    </Punto>
    <!--Tiempo de activacion-->
    <TiempoEncendido unidades="s">10.0</TiempoEncendido>
    <!--Tiempo de espera posterior-->
    <TiempoEspera unidades="s">5.0</TiempoEspera>
    <ValvulasGas>si</ValvulasGas>
    <!--Angulos de Euler aplicados a la herramienta-->

```

```

<Theta unidades="grados">0.0</Theta>
<Psi unidades="grados">0.0</Psi>
<Consigna unidades="volts">0.0</Consigna>
<Control list="">
  <Range id0="0.5" id1="1.5" />
  <Proporcional id0="36.0" id1="15.0" />
  <Integral id0="0.12" id1="0.05" />
  <Derivativo id0="2.0" id1="5.0" />
</Control>
<!--Velocidad a la que se realizara el movimiento-->
<Velocidad unidades="mm/s">10.0</Velocidad>
<!--Aceleracion maxima permitida-->
<Aceleracion unidades="mm/s^-1">20.0</Aceleracion>
<ProgLaser unidades="entero">6</ProgLaser>
<!--Voltajes de tolvas cladding-->
<VTolvaA unidades="volt">0.0</VTolvaA>
<VTolvaB unidades="volt">0.0</VTolvaB>
</Desplazamiento>
</Trayectoria>
</Programa>

```

Aunque, como se puede observar, el formato es simple, es necesario conocer minimamente el proceso que se va a llevar a cabo, a fin de poder establecer los valores correctos de los parametros de trabajo.

No se procedera a la explicacion pormenorizada del presente ejemplo, por entender que no se trata del objetivo fundamental del texto formar al lector en la utilizacion de la aplicacion, si no en describir y justificar la metodologia en que basa su funcionamiento.

3.4. Realizacion de trayectorias mediante sistema robotizado

Una vez obtenido el conjunto de elementos que definen la trayectoria, esta debe recorrerse utilizando algun tipo de sistema de traslacion. En el presente trabajo, se ha empleado como sistema de ejemplo para validar la metodologia descrita un robot industrial de 6 grados de libertad. Dicho sistema es complejo y tiene gran flexibilidad, por lo que esta plenamente justificada su utilizacion en este caso. Se presentan aqui parte de las tareas adicionales que deben llevarse a cabo para obtener trayectorias descritas para el sistema robotizado partiendo de las genericas.

3.4.1. Conceptos generales

A continuacion se definen una serie de conceptos que es necesario conocer para comprender el metodo propuesto para efectuar la realizacion de trayectorias.

Cuadrantes del robot

Para definir completamente el desplazamiento del robot, es necesario describir la posicion final de los ejes y actuadores de modo univoco. Debe tenerse en cuenta que, en general, existen multiples soluciones que permiten alcanzar la posicion deseada, pero algunos de los casos, o bien no permiten realizar el desplazamiento a velocidad constante, o bien condicionan que los siguientes elementos de la trayectoria sean inalcanzables si se mantiene la velocidad. Es por lo tanto necesario seleccionar una unica posicion de todas aquellas posibles, y una vez seleccionado, debe indicarse al sistema del robot la que corresponda en cada caso, empleando para ello el concepto de cuadrante, que especifica en qué rango de una revolución completa de encuentran los ejes.

Las configuraciones de los ejes del robot del caso descrito se designan con cuatro números enteros (n_1, n_2, n_3, n_4) que especifican en qué cuadrante de una revolución completa de encuentran los ejes siguientes

- n_1 representara el cuadrante para la posición del eje 1
- n_2 representara el cuadrante para la posición del eje 4
- n_3 representara el cuadrante para la posición del eje 6
- n_4 representara el cuadrante auxiliar para la posición de un eje virtual que especifica el centro de la muñeca en relación al resto de ejes

Se consideraran los valores de 0 a 3 como cuadrantes positivos, es decir, que serán recorridos en sentido contrario a las agujas del reloj y los valores de -1 a -4 como cuadrantes negativos, es decir, que serán recorridos en sentido a las agujas del reloj.

Existen varios criterios de programación específicos que permiten evitar que se produzcan saltos o giros debidos a cambios bruscos de cuadrantes, pero no se tratarán en detalle, por considerarse una solución parcial y entender que su funcionamiento queda más claro en el propio código que describiendo la problemática y la resolución.

Singularidades del robot

En el caso de los brazos robóticos es habitual emplear jacobianos para describir la relación entre la velocidad de los ejes del brazo y la velocidad del TCP. Existen una serie de casos en los que al invertir dichos jacobianos, se comprueba que no existe solución o que hay infinitas soluciones, puntos que reciben el nombre de singularidades.

Normalmente las singularidades se encuentran cerca del límite de funcionamiento de los ejes del robot, debido al escaso margen de maniobra que suele quedar para efectuar nuevos desplazamientos en cualquier dirección que no sea la que ha llevado al sistema a su posición pero de sentido inverso.

Pueden darse también, sin embargo, singularidades dentro del espacio de trabajo, siendo estas las más peligrosas. Dichas singularidades suelen producirse en posiciones del robot con dos o más ejes con origen coincidente. En estos casos, hay que definir de modo estricto los desplazamientos para evitarlas, ya que el sistema intentará realizar el desplazamiento del TCP llevando hasta el límite la velocidad de los ejes, afectando negativamente tanto al robot como al propio tratamiento que se pretende realizar.

3.4.2. Caso de ejemplo: Sistema de brazo robotizado y posicionador

En ciertas aplicaciones industriales sobre geometrías tridimensionales, además de situar y orientar la herramienta por medio de un brazo robotizado se necesita cambiar la posición de la pieza a tratar para cumplir algún requerimiento extra.

Con un brazo robotizado de 6 ejes se pueden elegir los seis grados de libertad de la herramienta (posición y orientación) pero en ciertas aplicaciones de soldadura o recubrimiento superficial, como en el caso del cladding, puede ser necesario mantener la verticalidad del eje de la herramienta o permitir únicamente un ángulo de rotación relativamente pequeño. Si la superficie no es plana se puede utilizar otro sistema robotizado para orientar la pieza, aunque, en el caso de que solo sea necesario orientar la normal a la superficie de la pieza según la dirección vertical, basta con un posicionador de dos ejes para realizar esta función. La herramienta se sitúa luego sobre la vertical del punto en que se va aplicar la herramienta a la altura adecuada utilizando un robot de tipo pórtico (bastaría con 3 ejes) o de tipo brazo.

En la figura 3.11 se muestra el sistema que se encuentra en el Laboratorio de Aplicaciones Industriales del Láser que consta de un brazo robotizado de 6 ejes (ABB IRP 2400/16 L) y una mesa giratoria o posicionador de 2 ejes (ABB IRBP 500A/M). El brazo sujeta la herramienta, en este caso un cabezal para recubrimiento por láser, y sobre el posicionador hay una mesa rectangular a la que se fijan las piezas a procesar.

Figura 3.11: Brazo robotizado de 6 ejes con la herramienta (cabezal para recubrimiento por láser) y posicionador de 2 ejes en el LAIL.

3.4.3. Brazo robotizado IRP 2400/16

Este brazo robotizado de 6 grados de libertad permite desplazar la herramienta para posicionarla en el punto de trabajo, o bien efectuar trayectorias durante las que se lleva a cabo el tratamiento. Es adecuado para aplicaciones que requieren precision media-alta, usan herramientas que no tengan una masa excesivamente elevada y el alcance no es un factor determinan

Se han incluido las características técnicas del equipo (ver A.5) a efectos documentales, aunque la mayoría de ellas no serán necesarias para su uso habitual, si permiten obtener una visión general de las limitaciones y capacidades del sistema.

3.4.4. Sistemas de coordenadas de IRP 2400/16

El sistema de coordenadas base del robot (S_0) tiene el origen en el punto intersección del primer eje del robot con la de la base del mismo. El primer eje del robot es el eje z y el eje x hacia adelante.

La brida para herramientas del robot tiene 6 orificios para tornillos de rosca M6 y un orificio sin rosca de 6 mm de diámetro, *orificio de control*, que sirve como referencia del sistema de coordenadas de la brida (S_6), figura 3.12: el origen en el centro de la superficie de la brida, z es normal hacia afuera y x opuesto al orificio de control.

Figura 3.12: Sistema de coordenadas base del Robot (S_0) y de la brida para herramientas (S_6).

Figura 3.13: Sistema de coordenadas de la herramienta, tal como se suele definir para una pistola de soldadura al arco (izquierda) y para una pistola de soldadura por puntos (derecha).

Tomando como TCP (tool center point) del cabezal láser el extremo inferior del cono, la posición de S_7 en el sistema de referencia de la brida S_6 sería $x = 287.7$ mm y $z = 110$ mm. La orientación del sistema respecto 7 del 6 vendría dada por

$$(\hat{i} \ \hat{j} \ \hat{k}) = (\hat{i} \ \hat{j} \ \hat{k}) R_{67}$$

donde

$$R_{67} = (R_{76})^t = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

que corresponde a un giro $\Phi = -\pi/2$ alrededor del eje $\hat{\mathbf{n}} = \hat{\mathbf{j}}$.

Si la transformación se expresa mediante los ángulos de Euler se tendría:

$$\psi = \frac{\pi}{2}, \quad \theta = -\frac{\pi}{2}, \quad \varphi = \frac{\pi}{2}$$

y si se expresa por medio de un cuaternio:

$$q = \left[\frac{\sqrt{2}}{2}, 0, -\frac{\sqrt{2}}{2}, 0 \right]$$

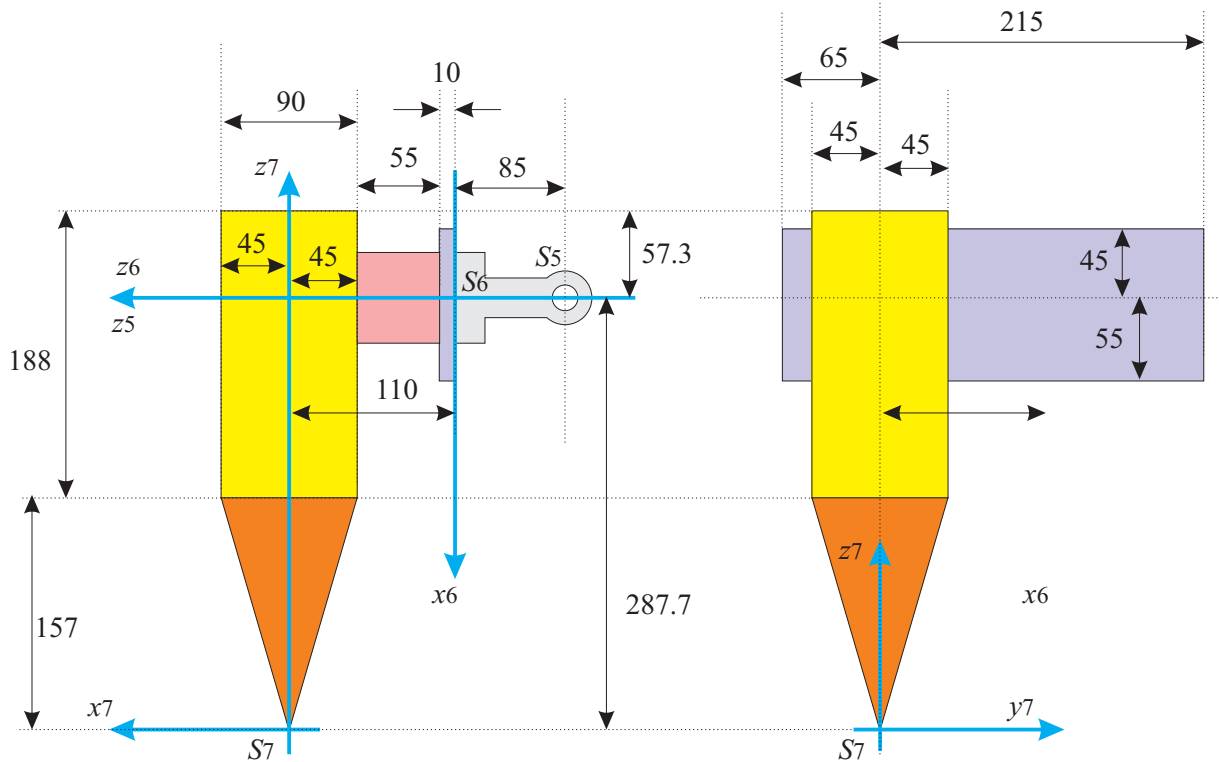


Figura 3.14: Esquema del cabezal láser colocado sobre la muñeca del robot IRB2400/16. Perfil y alzado. Las cotas están en milímetros.

Parámetros DH

De acuerdo con el algoritmo Denavit-Hartenberg (descrito en A.4) se obtienen los sistemas de coordenadas de la figura 3.15. Se ha tomado como sistema de la herramienta S_7 uno cuya orientación coincida con la de la base del robot cuando todos los ángulos son cero.

Con los ejes de la figura anterior y teniendo en cuenta las dimensiones del IRB2400/16, los parámetros DH son los de la tabla 3.1.

Debe notarse que la transformación del sistema respecto 7 del 6 no puede expresarse por medio de los parámetros DH. Tampoco es posible con esta transformación pasar del sistema de la brida de la herramienta de la figura 3.12 a un sistema de la herramienta como el de la figura 3.13.

Alternativamente, si es posible elegir una orientación diferente del sistema 6 (brida para la herramienta) que haga posible obtener el sistema 7 con parámetros DH. Los parámetros DH alternativos son los de la tabla 3.2.

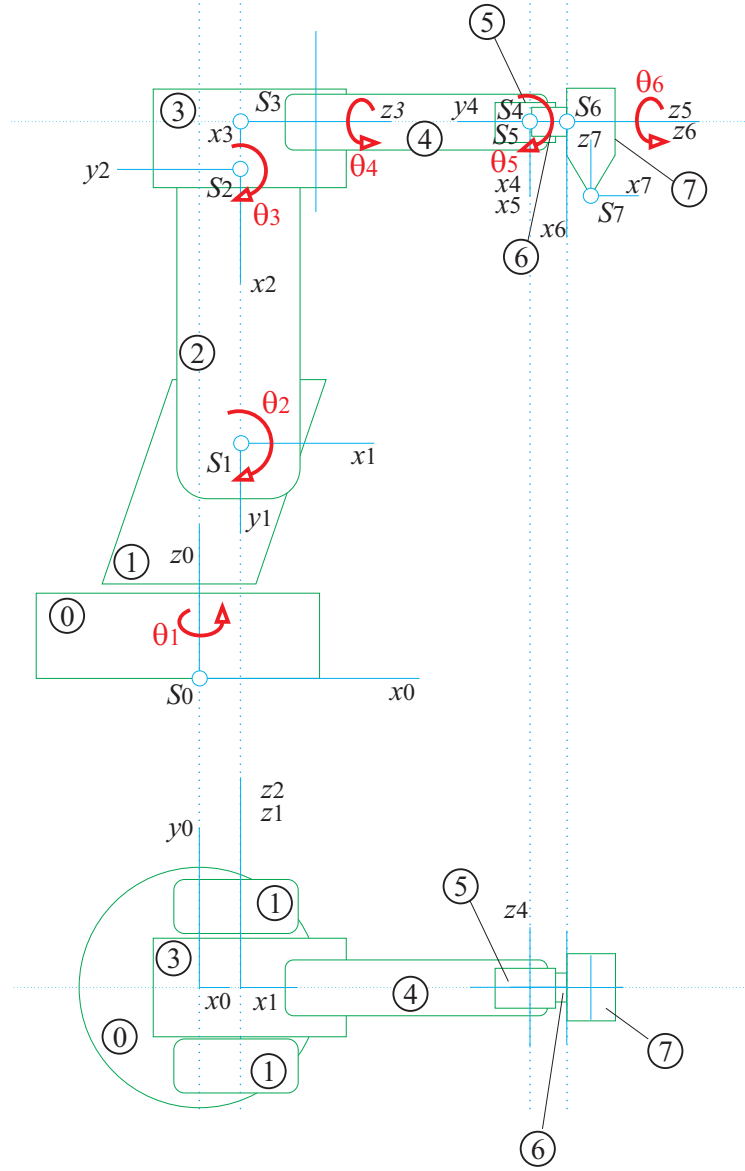


Figura 3.15: Sistema de coordenadas del algoritmo DH para el robot de IRB2400/16 y la herramienta.

Alcance de la muñeca

La posición del centro de la muñeca (origen de los sistemas S_4 y S_5) en función de los ángulo θ_2 y θ_3 es:

$$X = 100 + 705 \sin \theta_2 + 135 \sin(\theta_2 + \theta_3) + 755 \cos(\theta_2 + \theta_3)$$

$$Z = 615 + 705 \cos \theta_2 + 135 \cos(\theta_2 + \theta_3) - 755 \sin(\theta_2 + \theta_3)$$

Con estas ecuaciones se calcula el alcance del centro de la muñeca que se representa en la figura 3.16. Los rangos totales para los ejes x y z son 2900 mm y 2458 mm respectivamente. Los puntos marcados en la figura son los que se utilizan para la calibración y aparecen en la tabla 3.3.

3.4.5. Problema directo

El problema directo consiste en obtener la posición, las transformaciones y orientación del sistema ligado a la herramienta para un valor dado de los seis ángulos $\{\theta_i, i = 1, \dots, 6\}$. Para

Cuadro 3.1: Parámetros DH del IRB2400/16 acordes con la documentacion.

i	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	θ_1	615 mm	100 mm	-90°
2	$\theta_2 + 90^\circ$	0	-705 mm	0
3	θ_3	0	-135 mm	90°
4	θ_4	755 mm	0	-90°
5	θ_5	0	0	90°
6	θ_6	85 mm	0	0

Cuadro 3.2: Parámetros DH del IRB2400/16 alternativos que incluyen el sistema final de la herramienta.

i	θ_i	d_i	a_i	α_i
1	θ_1	615 mm	100 mm	-90°
2	$\theta_2 - 90^\circ$	0	705 mm	0
3	θ_3	0	135 mm	-90°
4	θ_4	755 mm	0	90°
5	θ_5	0	0	-90°
6	θ_6	195 mm	-287.7 mm	0
7	-90°	0	0	90°

Cuadro 3.3: Coordenadas del centro de la muñeca para los puntos utilizados en la calibración del IRB2400/16.

Pos	θ_2	θ_3	$X/(mm)$	$Z/(mm)$
0	0	0	855.0	1455.0
1	0	-60	360.6	2041.3
2	0	65	541.4	692.8
3	110	-60	1351.2	-117.7
4	110	18.3	400.5	-302.3
5	-100	-60	-1349.9	623.9
6	-100	65	-53.3	1036.2

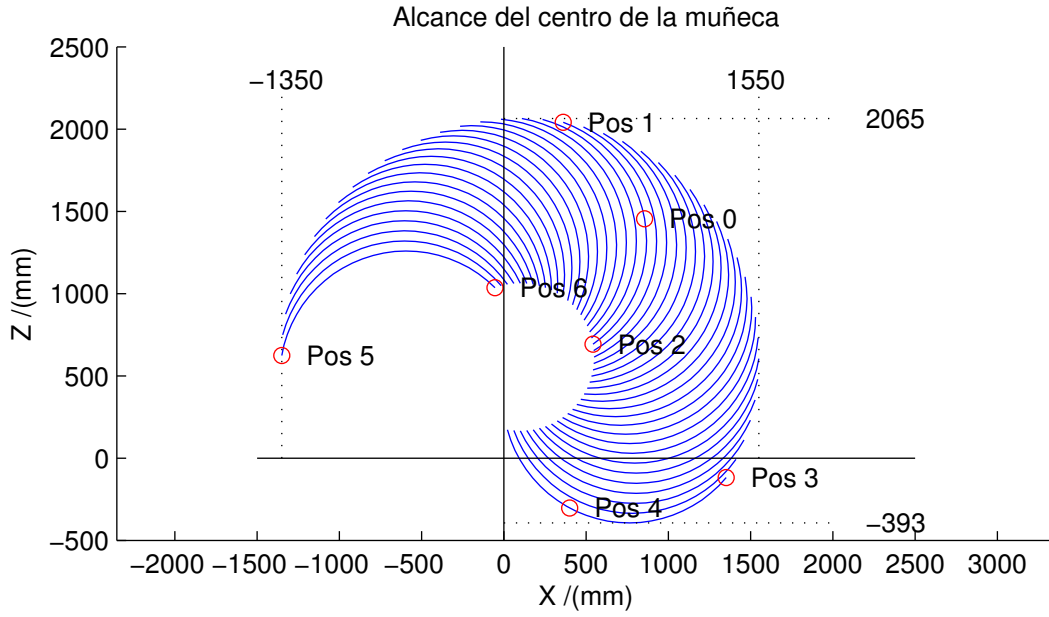


Figura 3.16: Alcance del centro de la muñeca en función de los ángulos 2 y 3

ello basta escribir las transformaciones de acuerdo con los valores de los parámetros DH de la tabla 3.1. Así,

$${}^0A_1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & -\sin \theta_1 & a_1 \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 & 0 & \cos \theta_1 & a_1 \sin \theta_1 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^1A_2 = \begin{bmatrix} -\sin \theta_2 & -\cos \theta_2 & 0 & a_2 \sin \theta_2 \\ \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & -a_2 \cos \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^2A_3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & 0 & \sin \theta_3 & -a_3 \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & 0 & -\cos \theta_3 & -a_3 \sin \theta_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^3A_4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & 0 & -\sin \theta_4 & 0 \\ \sin \theta_4 & 0 & \cos \theta_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^4A_5 = \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & 0 & \sin \theta_5 & 0 \\ \sin \theta_5 & 0 & -\cos \theta_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$${}^5A_6 = \begin{bmatrix} \cos \theta_6 & -\sin \theta_6 & 0 & 0 \\ \sin \theta_6 & \cos \theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Teniendo en cuenta la definición de la herramienta se tiene,

$${}^6A_7 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & a_7 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & d_7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

donde $a_7 = 287.7 \text{ mm}$ y $d_7 = 110 \text{ mm}$.

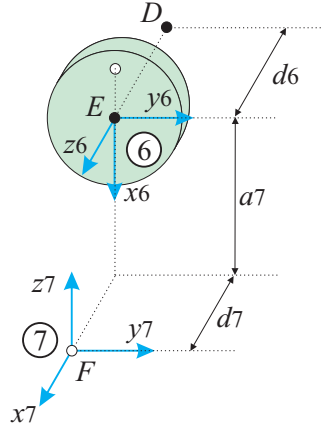


Figura 3.17: Esquema para definir la herramienta. F es el TCP que en este caso es el extremo de la boquilla del cabezal láser.

El problema directo se expresa como

$$\begin{pmatrix} x_7 & y_7 & z_7 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 & y_0 & z_0 & 1 \end{pmatrix} {}^0A_7$$

donde

$${}^0A_7 = {}^0A_1 {}^1A_2 {}^2A_3 {}^3A_4 {}^4A_5 {}^5A_6 {}^6A_7$$

3.4.6. Problema inverso: Desacoplo cinemático

En la resolución del problema inverso, obtención de los seis ángulos del robot para una posición y orientación dada del sistema ligado a la herramienta se utiliza un procedimiento llamado *desacoplo cinemático* que consiste en dividir el problema en dos partes: utilizando los tres primeros ángulos para situar el centro de la muñeca y los últimos tres ángulos para orientar la herramienta.

Incluyendo la herramienta S_7

Llamando O al origen del sistema base del robot (S_0), D al centro de la muñeca (S_4) y F al TCP (S_7) se tiene que $\vec{OF} = \vec{OD} + \vec{DF}$ de donde

$$\vec{OD} = \vec{OF} - \vec{DF}$$

donde el vector \vec{DF} en el sistema 7 tiene por componentes:

$$\vec{DF}_7 = \vec{DE}_7 + \vec{EF}_7 = \begin{pmatrix} d_6 + d_7 \\ 0 \\ -a_7 \end{pmatrix}$$

siendo E el centro de la brida donde se sujeta la herramienta.

Dada la posición de F en el sistema 0 y la orientación de la herramienta 0A_7 , la posición del centro de la muñeca:

$$\begin{pmatrix} x_0^D \\ y_0^D \\ z_0^D \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0^F \\ y_0^F \\ z_0^F \\ 1 \end{pmatrix} - {}^0A_7 \begin{pmatrix} d_6 + d_7 \\ 0 \\ -a_7 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Las coordenadas del punto D son las del origen del sistema 4 y por tanto,

$$\begin{pmatrix} x_0^D \\ y_0^D \\ z_0^D \\ 1 \end{pmatrix} = {}^0A_4 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

y se obtiene

$$\begin{aligned} x_0^D &= \cos \theta_1 [a_1 + |a_2| \sin \theta_2 + \ell_3 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \varphi_3)] \\ y_0^D &= \sin \theta_1 [a_1 + |a_2| \sin \theta_2 + \ell_3 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \varphi_3)] \\ z_0^D &= d_1 + |a_2| \cos \theta_2 + \ell_3 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \varphi_3) \end{aligned}$$

donde $\ell_3 = \sqrt{a_3^2 + d_4^2}$ y $\varphi_3 = \arctan(d_4/|a_3|)$.

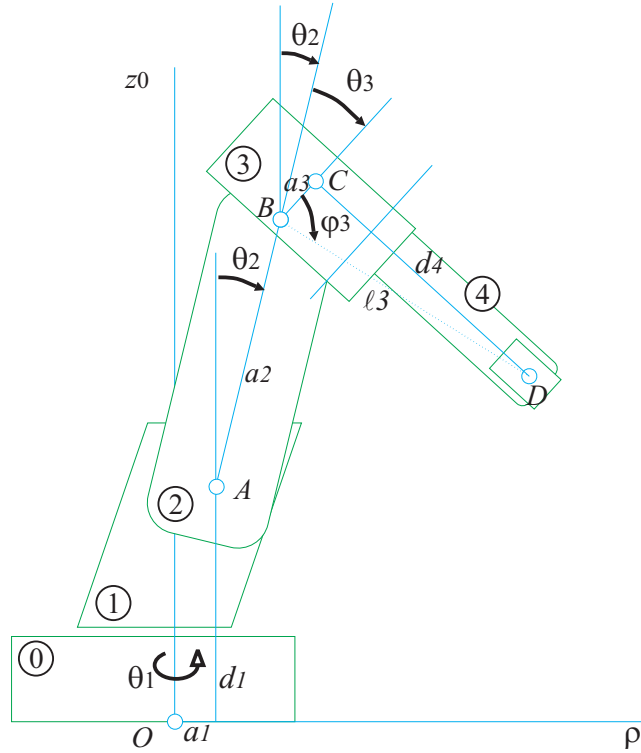


Figura 3.18: Esquema del para determinar los tres primeros ángulos del robot.

Utilizando coordenadas cilíndricas, la coordenada radial es:

$$\rho_D = \sqrt{x_D^2 + y_D^2} = a_1 + |a_2| \sin \theta_2 + \ell_3 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \varphi_3)$$

mientras que el ángulo coincide con θ_1 , entonces,

$$\theta_1 = \arctan \frac{y_D}{x_D}$$

El triángulo ABD determina el ángulo θ_3 por el teorema del coseno:

$$\overline{AD}^2 = a_2^2 + \ell_3^2 + 2|a_2|\ell_3 \cos(\theta_3 + \varphi_3)$$

de donde

$$\theta_3 = \arccos\left(\frac{\overline{AD}^2 - a_2^2 - \ell_3^2}{2|a_2|\ell_3}\right) - \varphi_3$$

siendo $\overline{AD}^2 = \left(\sqrt{x_D^2 + y_D^2} - a_1\right)^2 + (z_D - d_1)^2$.

Conocido θ_3 el ángulo 2 se obtiene de ρ_D o de z_D . Para ello se utiliza el cambio de variable $u = \cos \theta_2$ con lo que el problema se transforma en buscar las raíces de la función:

$$f(u) = z_D - d_1 - [|a_2| + \ell_3 \cos(\theta_3 + \varphi_3)] u - \ell_3 \sin(\theta_3 + \varphi_3) \sqrt{1 - u^2}$$

que conduce a un polinomio de segundo grado en u . Esta ecuación presenta una ambigüedad ya que hay dos soluciones similares, una con el *codo arriba* y otra con el *codo abajo*, véase figura 3.19. Para nuestro caso seleccionados codo arriba, $-\pi/2 < \theta_2 < \pi/2$, que equivale a buscar la raíz positiva, $u > 0$, y quedarse con $\theta_2 = +\arccos(u)$.

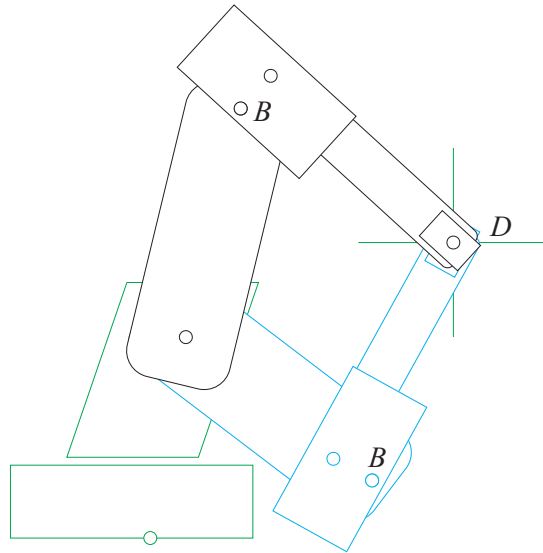


Figura 3.19: Se puede obtener la misma posición de la muñeca, D , con dos configuraciones distintas: con el codo B arriba (en negro) o con el codo abajo (en azul).

Los últimos tres ángulos se obtienen de la transformación que lleva el sistema 3 al 6 (o al 7 ya que estos dos están ligados rígidamente). Los tres ángulos se encuentran representados en la figura 3.20. Los cambios de ejes correspondientes se representan en la figura 3.21.

La matriz de transformación del sistema 3 al 6:

$${}^3A_6 = \begin{pmatrix} \cos \theta_4 \cos \theta_5 \cos \theta_6 - \sin \theta_4 \sin \theta_6 & -\cos \theta_4 \cos \theta_5 \sin \theta_6 - \sin \theta_4 \cos \theta_6 & \cos \theta_4 \sin \theta_5 & d_6 \cos \theta_4 \sin \theta_5 & 0 \\ \cos \theta_4 \sin \theta_6 + \sin \theta_4 \cos \theta_5 \cos \theta_6 & \cos \theta_4 \cos \theta_6 - \sin \theta_4 \cos \theta_5 \sin \theta_6 & \sin \theta_4 \sin \theta_5 & d_6 \sin \theta_4 \sin \theta_5 & 0 \\ -\sin \theta_5 \cos \theta_6 & \sin \theta_5 \sin \theta_6 & \cos \theta_5 & d_6 \cos \theta_5 + d_7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

tiene una submatriz de rotación, 3R_6 que coincide la matriz de los ángulos de Euler para:

$$\psi = \theta_4 + \frac{\pi}{2}, \quad \theta = \theta_5, \quad \varphi = \theta_6 - \frac{\pi}{2}$$

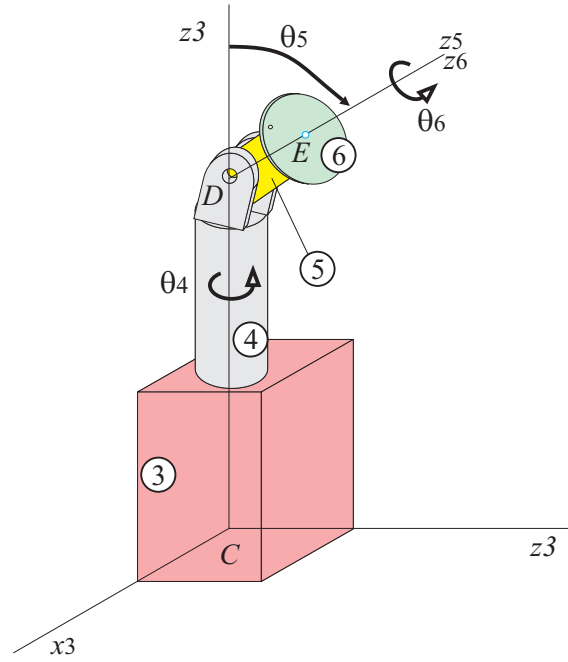


Figura 3.20: Esquema de los últimos tres ángulos del robot.

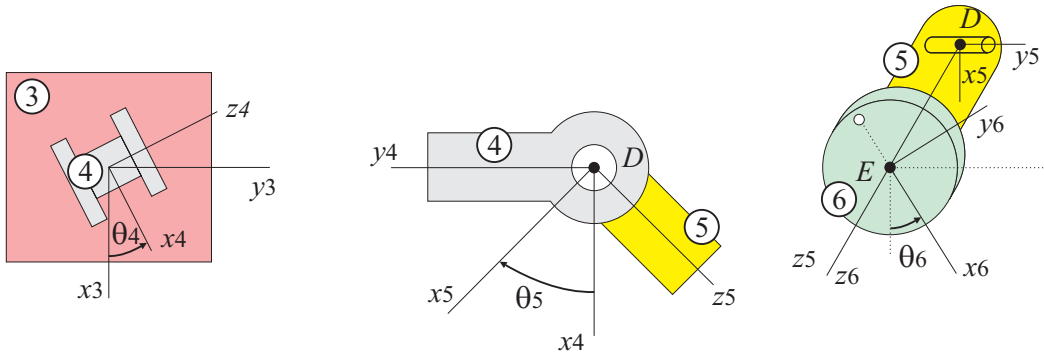


Figura 3.21: Cambios de ejes correspondientes a los últimos tres ángulos del robot.

Este resultado es importante porque permite ajustar los cuadrantes evitando el bloqueo del robot. En la figura 3.22 se muestran la relación entre los ángulos de Euler y los ángulos 4 al 6 del robot, llevando los sistemas 3, 4, 5 y 6 a un origen común. Se ha elegido la línea de los nodos coincidiendo en dirección y sentido con z_4 .

El método para extraer los ángulos θ_4 , θ_5 y θ_6 de la matriz de rotación es similar al empleado con los ángulos de Euler. Lo haremos para la matriz de rotación 37.

- En primer lugar, con los tres primeros ángulos se determina la matriz de transformación 0A_3 y su inversa 3A_0 .

- La matriz 37 se obtiene como

$${}^3A_7 = {}^3A_0 {}^0A_7$$

- El ángulo θ_5 se obtiene del elemento (3,1) de la matriz R_{37} ,

$$\theta_5 = \arccos [R_{37}(1,3)]$$

- Si $\theta_5 > \pi/2$ entonces $\theta_5 = \theta_5 - \pi$ con lo que $\theta_5 \in [-\pi/2, +\pi/2]$.

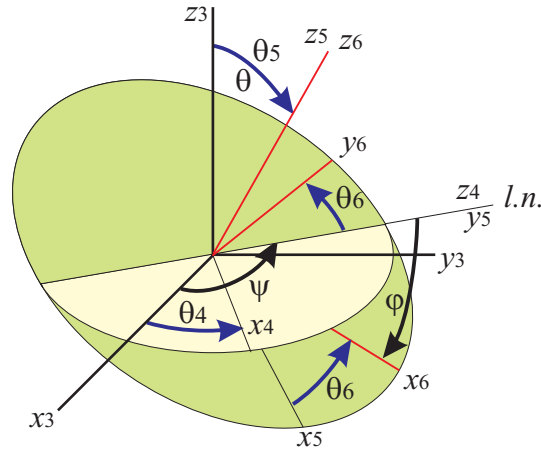


Figura 3.22: Cambios de orientación de los ejes 3 al 6 y su relación con los ángulos de Euler.

- Si $\theta_5 = 0$ los ejes z_4 y z_6 son paralelos y entonces:

$$\theta_4 = 0$$

$$\theta_6 = \arctan \left[\frac{R_{37}(1, 2)}{R_{37}(1, 3)} \right]$$

- Si $\theta_5 \neq 0$ entonces:

$$\theta_4 = \arctan \left[\frac{R_{37}(2, 1) / \sin \theta_5}{R_{37}(1, 1) / \sin \theta_5} \right]$$

$$\theta_6 = \arctan \left[\frac{R_{37}(3, 2) / \sin \theta_5}{R_{37}(3, 3) / \sin \theta_5} \right]$$

en donde se divide por $\sin \theta_5$ para quitar el signo de θ_5 .

Nota. Las arcotangentes deben realizarse con la función **atan2** que proporciona un resultado en el rango $[-\pi, +\pi]$.

Sin incluir la herramienta S_6

El procedimiento de inversión anterior lleva incluida la definición de la herramienta por lo que si se cambia la herramienta, y con ello la orientación de los ejes del sistema S_7 , dejará de ser válido. La alternativa pasa por utilizar un procedimiento que no dependa de la transformación 67 desde la brida al TCP de la herramienta.

Así, con toda generalidad, la herramienta está definida en el sistema S_6 mediante el vector \vec{EF} y un cuaternio q_{76} que da la orientación del sistema S_7 respecto del S_6 . Entonces, las coordenadas del centro de la muñeca D en el sistema S_6 son,

$$\vec{DF}_6 = \vec{DE}_6 + \vec{EF}_6 = \begin{pmatrix} a_6 + EF_{x6} \\ EF_{y6} \\ d_6 + EF_{z6} \end{pmatrix}$$

La matriz de rotación 7R_6 se obtiene directamente del cuaternio q_{76} ,

$$q_{76} \Rightarrow {}^7R_6$$

y entonces,

$$\begin{pmatrix} x_D \\ y_D \\ z_D \end{pmatrix}_0 = \begin{pmatrix} x_F \\ y_F \\ z_F \end{pmatrix}_0 - {}^0R_7 {}^7R_6 \begin{pmatrix} a_6 + EF_{x6} \\ EF_{y6} \\ d_6 + EF_{z6} \end{pmatrix}$$

Las coordenadas de la muñeca permiten obtener los ángulos θ_1 , θ_2 y θ_3 como acabamos de ver. Los tres últimos ángulos se obtienen de forma similar a la anterior pero con la matriz 36,

- La matriz 36 se obtiene como

$${}^3R_6 = {}^3R_0 {}^0R_7 {}^7R_6$$

- El ángulo θ_5 se obtiene del elemento (3, 3) de la matriz R_{36} ,

$$\theta_5 = \arccos [R_{36}(3, 3)]$$

- Si $\theta_5 > \pi/2$ entonces $\theta_5 = \theta_5 - \pi$ con lo que $\theta_5 \in [-\pi/2, +\pi/2]$.
- Si $\theta_5 = 0$ los ejes z_4 y z_6 son paralelos y entonces:

$$\theta_4 = 0$$

$$\theta_6 = \arctan \left[\frac{-R_{36}(1, 2)}{R_{36}(1, 1)} \right]$$

- Si $\theta_5 \neq 0$ entonces:

$$\theta_4 = \arctan \left[\frac{R_{36}(2, 3)/\sin \theta_5}{R_{36}(1, 3)/\sin \theta_5} \right]$$

$$\theta_6 = \arctan \left[\frac{R_{36}(3, 2)/\sin \theta_5}{-R_{36}(3, 1)/\sin \theta_5} \right]$$

en donde se divide por $\sin \theta_5$ para quitar el signo de θ_5 .

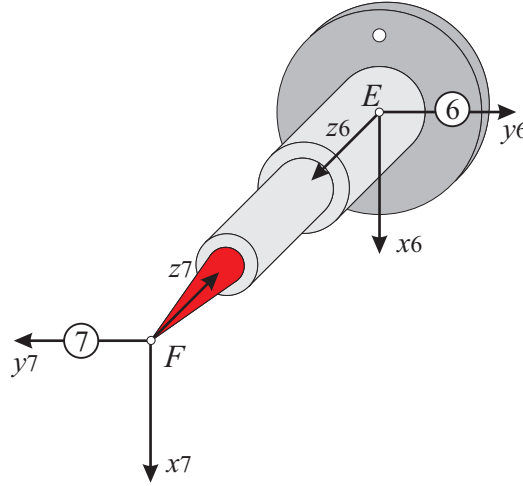


Figura 3.23: Herramienta con una orientación diferentes del sistema 7.

3.4.7. Orientación de la herramienta respecto de la trayectoria

Para conseguir que la orientación de la herramienta cumpla las condiciones impuestas por el proceso (una cierta inclinación del haz sobre la normal a la superficie) y a la vez facilitar la programación del robot, se ha desarrollado un algoritmo basado en el triedro intrínseco $\{\hat{\mathbf{T}}, \hat{\mathbf{N}}, \hat{\mathbf{B}}\}$ asociado a la trayectoria a realizar.

Llamando 8 al sistema que tiene la orientación del triedro y el origen en el punto F (TCP). El problema a resolver es conocidas las componentes del triedro en la base del sistema 0,

$$R_{80} = \begin{pmatrix} T_x & T_y & T_z \\ N_x & N_y & N_z \\ B_x & B_y & B_z \end{pmatrix}$$

determinar la orientación del eje de la herramienta $\hat{\mathbf{x}}$ respecto del triedro por medio de los dos primeros ángulos de Euler (ψ, θ) . El tercer ángulo φ se elegirá con la condición de que $\hat{\mathbf{y}} \cdot \hat{\mathbf{x}} = 0$.

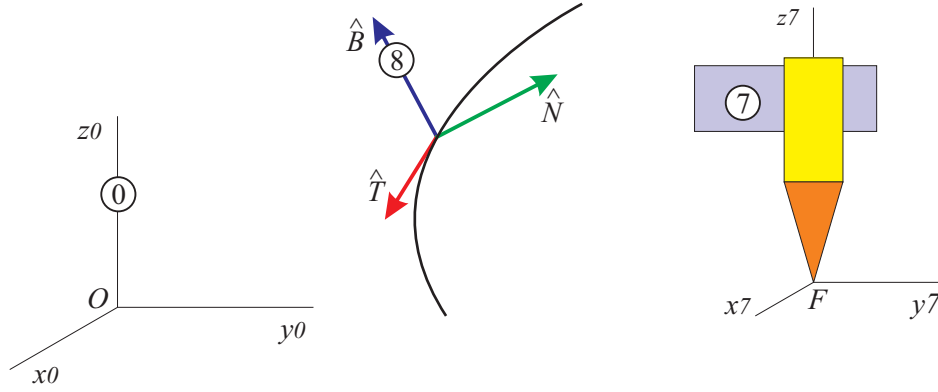


Figura 3.24: Sistemas de ejes para la orientación de la herramienta respecto de la trayectoria.

La condición $\hat{\mathbf{y}} \cdot \hat{\mathbf{x}} = 0$ impide que el eje mayor de la placa de aluminio que se encuentra entre la brida y el cabezal se mantenga en un plano $x_0 = cte$ impidiendo que la fibra del cabezal se enrede en el brazo.

Entonces, la matriz de rotación R_{78} vendrá dada por los tres ángulos e Euler,

$$R_{78} = \begin{pmatrix} \cos \varphi \cos \psi - \sin \varphi \sin \psi \cos \theta & \sin \varphi \cos \psi \cos \theta + \cos \varphi \sin \psi & \sin \varphi \sin \theta \\ -\cos \varphi \sin \psi \cos \theta - \sin \varphi \cos \psi & \cos \varphi \cos \psi \cos \theta - \sin \varphi \sin \psi & \cos \varphi \sin \theta \\ \sin \psi \sin \theta & -\cos \psi \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

La orientación del sistema 7 respecto del 0 se obtendrá multiplicando las matrices:

$$\begin{pmatrix} \hat{\mathbf{x}} \\ \hat{\mathbf{y}} \\ \hat{\mathbf{z}} \end{pmatrix} = R_{78} \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{T}} \\ \hat{\mathbf{N}} \\ \hat{\mathbf{B}} \end{pmatrix} = R_{78} R_{80} \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{x}} \\ \hat{\mathbf{y}} \\ \hat{\mathbf{z}} \end{pmatrix} = R_{70} \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{x}} \\ \hat{\mathbf{y}} \\ \hat{\mathbf{z}} \end{pmatrix}$$

por tanto

$$\begin{aligned}
\hat{\mathbf{x}} \cdot \hat{\mathbf{x}} &= (\cos \varphi \cos \psi - \sin \varphi \sin \psi \cos \theta) T_x + B_x \sin \varphi \sin \theta + N_x (\sin \varphi \cos \psi \cos \theta + \cos \varphi \sin \psi) \\
\hat{\mathbf{x}} \cdot \hat{\mathbf{y}} &= (\cos \varphi \cos \psi - \sin \varphi \sin \psi \cos \theta) T_y + B_y \sin \varphi \sin \theta + N_y (\sin \varphi \cos \psi \cos \theta + \cos \varphi \sin \psi) \\
\hat{\mathbf{x}} \cdot \hat{\mathbf{z}} &= (\cos \varphi \cos \psi - \sin \varphi \sin \psi \cos \theta) T_z + B_z \sin \varphi \sin \theta + N_z (\sin \varphi \cos \psi \cos \theta + \cos \varphi \sin \psi) \\
\hat{\mathbf{y}} \cdot \hat{\mathbf{x}} &= (-\cos \varphi \sin \psi \cos \theta - \sin \varphi \cos \psi) T_x + B_x \cos \varphi \sin \theta + N_x (\cos \varphi \cos \psi \cos \theta - \sin \varphi \sin \psi) \\
\hat{\mathbf{y}} \cdot \hat{\mathbf{y}} &= (-\cos \varphi \sin \psi \cos \theta - \sin \varphi \cos \psi) T_y + B_y \cos \varphi \sin \theta + N_y (\cos \varphi \cos \psi \cos \theta - \sin \varphi \sin \psi) \\
\hat{\mathbf{y}} \cdot \hat{\mathbf{z}} &= (-\cos \varphi \sin \psi \cos \theta - \sin \varphi \cos \psi) T_z + B_z \cos \varphi \sin \theta + N_z (\cos \varphi \cos \psi \cos \theta - \sin \varphi \sin \psi) \\
\hat{\mathbf{z}} \cdot \hat{\mathbf{x}} &= \sin \psi \sin \theta T_x - N_x \cos \psi \sin \theta + B_x \cos \theta \\
\hat{\mathbf{z}} \cdot \hat{\mathbf{y}} &= \sin \psi \sin \theta T_y - N_y \cos \psi \sin \theta + B_y \cos \theta \\
\hat{\mathbf{z}} \cdot \hat{\mathbf{z}} &= \sin \psi \sin \theta T_z - N_z \cos \psi \sin \theta + B_z \cos \theta
\end{aligned}$$

La condición $\hat{\mathbf{y}} \cdot \hat{\mathbf{x}} = 0$ determina el ángulo φ ,

$$\varphi = \arctan \left[\frac{(N_x \cos \psi - T_x \sin \psi) \cos \theta + B_x \sin \theta}{\cos \psi T_x + N_x \sin \psi} \right]$$

El usuario proporciona los otro dos ángulos (ψ, θ) y la trayectoria de la que se extrae el triedro $\{\hat{\mathbf{T}}, \hat{\mathbf{N}}, \hat{\mathbf{B}}\}$. Como para una curva cualquiera $\hat{\mathbf{B}}$ puede estar dirigido hacia abajo, $B_z < 0$, en ese caso hacemos el cambio $\theta = \pi - \theta$ para tomar como referencia la dirección hacia arriba. Con esa información se determinan los elementos de la matriz R_{70} y con ella el cuaternio para orientar la herramienta.

$$\begin{aligned}
q_0 &= \frac{1}{2} \sqrt{1 + \hat{\mathbf{x}} \cdot \hat{\mathbf{x}} + \hat{\mathbf{y}} \cdot \hat{\mathbf{y}} + \hat{\mathbf{z}} \cdot \hat{\mathbf{z}}} \\
q_1 &= \frac{\hat{\mathbf{y}} \cdot \hat{\mathbf{z}} - \hat{\mathbf{z}} \cdot \hat{\mathbf{y}}}{4 q_0} \\
q_2 &= \frac{\hat{\mathbf{x}} \cdot \hat{\mathbf{z}} - \hat{\mathbf{z}} \cdot \hat{\mathbf{x}}}{4 q_0} \\
q_3 &= \frac{\hat{\mathbf{x}} \cdot \hat{\mathbf{y}} - \hat{\mathbf{y}} \cdot \hat{\mathbf{x}}}{4 q_0}
\end{aligned}$$

3.4.8. Posicionador de 2 ejes IRBP

Este posicionador es para piezas que tienen que girar alrededor de 2 ejes para alcanzar la mejor posición en el proceso. Es adecuado para aplicaciones que necesitan una o dos estaciones.

El posicionador IRBP A se presenta en tres variantes y está diseñado para manipular piezas de hasta 750 Kg, incluido el utillaje. Este posicionador tiene una mesa fija.

Se han incluido las características técnicas del equipo (ver A.6) a efectos documentales, aunque la mayoría de ellas no serán necesarias para su uso habitual, si permiten obtener una visión general de las limitaciones y capacidades del sistema.

Figura 3.25: Posicionador de 2 ejes ABB IRBP 500A/M.

Descripción de los sistemas de coordenadas del posicionador

Aunque podría aplicarse el algoritmo DH al posicionador resulta más útil elegir los sistemas de coordenadas siguiendo la orientación del sistema base del robot.

El posicionador, figura 3.26, tiene 2 ejes de rotación E_1 y E_2 que se cortan en un punto O que tomaremos como origen de coordenadas del sistema base, $Ox_0y_0z_0$, al que denominaremos ①. En este sistema el eje Oz_0 es vertical hacia arriba y Ox_0 coincide con el eje E_1 . El sistema ① es solidario a la columna del posicionador (dibujada en color naranja en la figura 3.26) y es paralelo al sistema base del manipulador (dentro de la precisión con que se encuentran alineados).

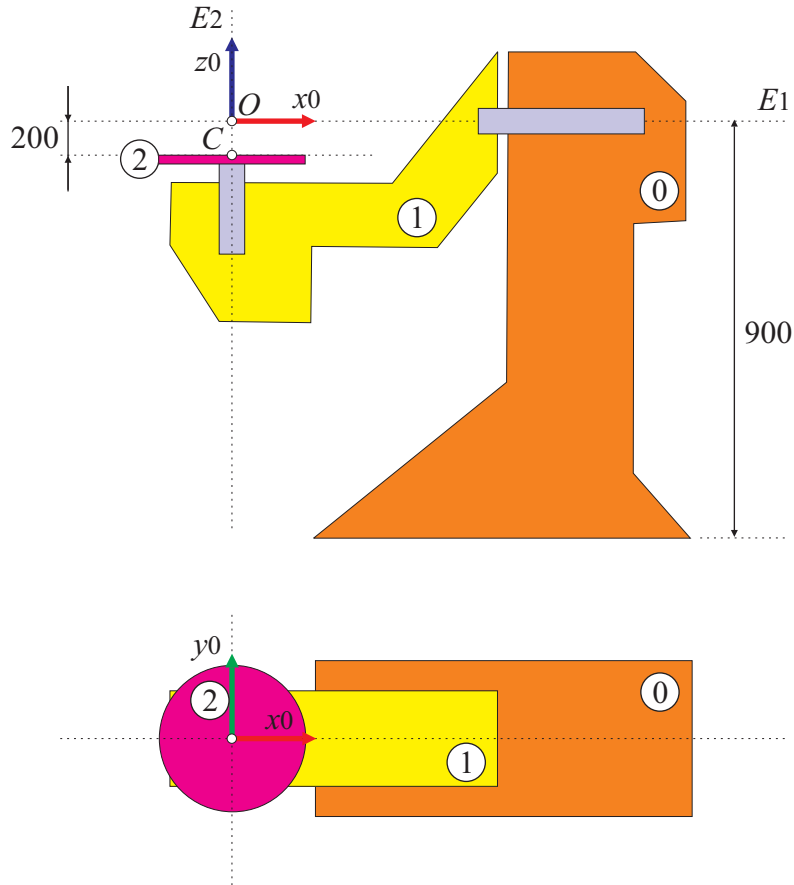


Figura 3.26: Alzado y planta del esquema del posicionador con los tres elementos: columna ①, brazo ① y disco ② que definen los tres sistemas de coordenadas.

El giro de ángulo θ alrededor del eje E_1 inclina el eje E_2 tal como se muestra en la figura 3.27 y se obtienen los ejes del sistema ①, $Ox_1y_1z_1$. El sistema ① es solidario al brazo del posicionador, dibujado en color amarillo en la figura 3.26.

Girando alrededor del eje E_2 un ángulo ϕ el plato giratorio alcanza la posición final. Con este giro los ejes de ① pasan a la orientación de ② que es el sistema de ejes solidario al disco.

El origen del sistema ② coincide con el centro del plato C y se encuentra en el eje z_2 a una altura h por debajo del punto O .

La orientación de los tres sistemas de ejes coordenados coincide cuando $\theta = \phi = 0$. Los tres sistemas se representan en la figura 3.27.

Las coordenadas del sistema ① respecto del ①, A_{10} , y las del sistema ② respecto del ①, A_{21} son:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix}$$

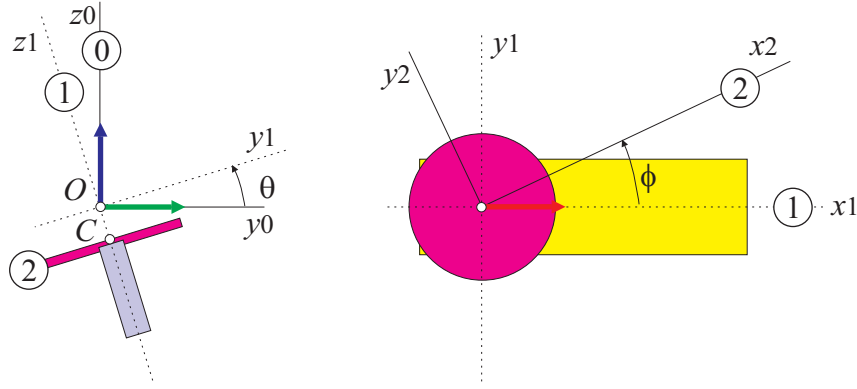


Figura 3.27: Sistemas de coordenadas utilizados en el posicionador.

por lo que la matriz de transformación es:

$$A_{20} = \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi \cos \theta & \sin \phi \sin \theta & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi \cos \theta & \cos \phi \sin \theta & 0 \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta & h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

La matriz de transformación del sistema ① respecto del ② queda:

$$A_{02} = \begin{pmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 & 0 \\ \sin \phi \cos \theta & \cos \phi \cos \theta & -\sin \theta & h \sin \theta \\ \sin \phi \sin \theta & \cos \phi \sin \theta & \cos \theta & -h \cos \theta \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

3.4.9. Conversion de trayectorias genericas a comandos del sistema robotizado

Como ya se ha indicado, es necesario convertir las trayectorias genericas a ordenes del sistema de traslación, de modo que estas se puedan llevar a cabo. Para realizar este proceso es necesario añadir datos adicionales a los ya presentes en la trayectoria generica, indispensables para que el robot pueda recorrer las posiciones descritas. Asumiendo que el posicionador se emplea unicamente para colocar la pieza de modo previo al recorrido de las trayectorias por parte de la herramienta, a continuacion se ennumeran los pasos necesarios para efectuar esta conversion:

- Se parte de un conjunto de elementos de trayectoria de tipo simple, descritos en el sistema de referencia absoluto del sistema de traslación. Deben incluirse igualmente los elementos de union auxiliares y los tramos de aceleracion y deceleracion.
- Se calculan los cuaternios para cada uno de los puntos de los elementos de trayectoria de tipo simple, obteniendose de modo directo a partir de los valores de inclinacion.
- Se efectuan los calculos de desacoplo cinematico para obtener las posiciones posibles de los ejes del robot en cada instante. En esta etapa se hace necesario obtener la variacion de los ejes a lo largo del desplazamiento para localizar cambios de cuadrantes y singularidades.
- Se aplica un criterio de transformacion a los saltos entre cuadrantes mayores que la unidad. Es necesario efectuar el calculo completo de la trayectoria, puesto que debe obtenerse una

secuencia valida para cada uno de los elementos, teniendo en cuenta que todos estan interrelacionados.

Actualmente el procedimiento se basa en comprobar los valores de angulos minimos y maximos para los ejes, y teniendo en cuenta su direccion de crecimiento o cambio, modificar los angulos originales de los ejes de modo previo a la realizacion de la trayectoria a fin de maximizar el rango de giro permitido en la direccion de trabajo. Si el eje no tuviera limites de giro, esta etapa puede obviarse.

Tambien es necesario buscar, en el momento en que aparecen saltos de cuadrantes de magnitud absoluta mayor que uno, puntos intermedios suficientes para permitir el calculo de las posiciones en que el cambio de cuadrante se produce de manera mas suave.

- Se buscan puntos de paso que coincidan con singularidades, a fin de evitarlas y sustituir dichos puntos por segmentos contenidos en la traza, que a su vez contengan a los puntos, si fuera posible.
- Se evalua la solucion, teniendo las coordenadas, cuaternios y cuadrantes de cada elemento de la trayectoria. En caso de ser realizable en las condiciones estipuladas de velocidad y aceleracion se continua con la generacion, en otro caso se detiene el proceso avisando del error.
- Se convierten los elementos a ordenes del robot, incluyendo la parte referente a operacion de elementos auxiliares del proceso.

Capítulo 4

Muestreo de datos y sistema de control

Tanto durante el recorrido de las trayectorias que permiten desplazar la herramienta para realizar el tratamiento, como durante la etapa previa y posterior al mismo, es posible emplear sensores que hagan posible la obtencion de informacion relativa al sustrato, a la evolucion del proceso, y a los resultados producidos despues de cada ciclo de tratamiento, permitiendo el analisis y/o control de dicho proceso. A continuacion se describiran brevemente las distintas categorias generales empleadas para clasificar segun su tipologia los modos de muestreo y control, procediendo a continuacion a indicar la metodologia basica empleada para llevar a cabo la adquisicion de datos y control del proceso, centrandose unicamente en los distintos sensores disponibles en los montajes descritos en 2

En nuestro contexto, se definira la adquisicion de datos como el proceso de obtener señales que miden o estan relacionadas con parametros fisicos del mundo real y convertir dichas señales en valores numericos que pueden ser tratados de modo digital. Determinar los valores de estos parametros, asi como conocer el momento en que alcanzan dichos valores permitira:

- Facilitar la comprension del fenomeno fisico subyacente que gobierna el proceso estudiado e incrementar el conocimiento tecnico relativo al mismo.
- Evaluar el impacto que tienen los diferentes parametros y sus variaciones en el resultado final.
- Almacenar la informacion de las distintas etapas del proceso, observando la evolucion del mismo y permitiendo el estudio de las areas tratadas con la herramienta.
- Estimar los valores optimos para los distintos parametros que hacen posible la obtencion de resultados de mejor calidad.
- Emplear los datos obtenidos para determinar que parametros son mas susceptibles de ser empleados a la hora de diseñar un sistema de control para el proceso, asi como para obtener los coeficientes que permiten la configuracion de dicho control.

En funcion del momento del proceso en que se lleva a cabo la obtencion de datos, se pueden diferenciar dos tipos de muestreo:

- Muestreo *online*: La adquisicion de datos se lleva a cabo durante la ejecucion del proceso, mientras se recorre la trayectoria, a fin de obtener informacion adicional relacionada con los fenomenos que tienen lugar mientras se muestrean las señales. Esta aproximacion puede dar lugar a ciertos problemas relacionados con la frecuencia de muestreo (ya que debe ser lo suficientemente elevada como para poder registrar los cambios de la variable que se esta midiendo a medida que estos se van produciendo), la interferencia de la herramienta (la luz del proceso puede ser una fuente de ruido que dificulte el uso de

sensores opticos) y la limitacion de la zona de medida (si el instrumento de medida viaja con la herramienta, su area de trabajo se limitara al alcance del mismo a lo largo de la trayectoria en la que se realiza el tratamiento, no pudiendo medir sus zonas aledañas). En el presente trabajo, este tipo de muestreo se emplea para obtener los datos de la camara CMOS, el fotodiodo y el pirometro en el caso del proceso de laser cladding, asi como para obtener los datos de la camara de alta velocidad en el caso del proceso de soldadura hibrida laser-arco.

- Muestreo *offline*: La adquisicion de datos se lleva a cabo antes de que comience, o bien cuando finalice, el proceso. Es una aproximacion util para evaluar los efectos producidos por la herramienta una vez efectuadas las trayectorias y llevado a cabo el tratamiento. Aunque en este caso sea recomendable llevar a cabo la obtencion de datos utilizando la mayor frecuencia de muestreo posible, a fin de reducir el tiempo de adquisicion, su valor no es critico, siendo ademas posible medir areas extensas de la pieza tratada, al no existir restricciones de desplazamiento.

En el presente trabajo, este tipo de muestreo se emplea para obtener los datos del escaner laser en el caso del proceso de laser cladding, asi como para obtener los datos del cabezal de seguimiento de linea en el caso del proceso de soldadura hibrida laser-arco.

Por otra parte, el concepto de control del proceso se puede describir como el conjunto de procedimientos y sistemas que permiten mantener ciertas salidas asociadas a un proceso especifico dentro de unos margenes establecidos. Los sistemas de control se usan habitualmente en la industria y en el ambito de la investigacion porque permiten la obtencion de resultados mas cercanos al optimo, ademas de evitar que las salidas asociadas al proceso alcancen regiones de inestabilidad que, en general, suponen la obtencion de piezas no validas.

Aunque existen multiples tipos de sistemas de control, la practica totalidad de los mismos puede incluirse en una de las dos categorias siguientes:

- Control de lazo abierto: Es el tipo mas simple de sistema de control. El sistema no utiliza ningun tipo de realimentacion para comprobar si alguna de las señales asociadas al proceso ha alcanzado un valor determinado. Esto significa que el sistema de control no tendra en cuenta las salidas de los procesos que esta manejando y simplemente fijara el valor de ciertos parametros a lo largo del proceso. Puede utilizar una o varias variables para llevar a cabo tareas de control en base a ecuaciones o modelos obtenidos del estudio del proceso que tenga asignado.

En el presente trabajo, este tipo de control se emplea para llevar a cabo procesos de laser cladding manteniendo constantes durante el proceso el valor de velocidad, potencia del haz laser, distancia a la pieza de trabajo, caudal de polvo y gas. Tambien se emplea en el caso de micromecanizado laser y de la soldadura hibrida laser-arco, manteniendo constantes velocidad, potencia del haz laser y distancia a la pieza de trabajo.

- Control de lazo cerrado: Aunque si no se encuentra correctamente ajustado puede llegar a causar inestabilidades en el proceso, es el tipo de control mas fiable. La señal de realimentacion se evaluara en cada instante, a fin de que pueda utilizarse dicho valor para modificar ciertas variables del proceso. Dichas variables se modificaran segun una ecuacion o serie de ecuaciones definida en el propio controlador, de modo que se minimice el error entre las distintas señales de realimentación y los valores de consigna o *setpoints* descritos para cada una de ellas.

En el presente trabajo, se han descrito varias configuraciones basadas en un controlador de lazo cerrado tipo PID para realizar procesos de laser cladding.

En funcion del momento del proceso en que se lleva a cabo la accion del sistema de control, se pueden diferenciar dos tipos de controles de proceso:

- Control de proceso *online*: Se seleccionaran una o mas señales, tales que reflejen fielmente el comportamiento del sistema dinamico a controlar, con la pretension de que mediante la accion del sistema de control alcancen un valor de referencia, que llamaremos consigna, a lo largo del tiempo. De igual manera, se seleccionaran uno o mas parametros del sistema, que se modificaran con una frecuencia establecida, a fin de obtener los mencionados valores de referencia en las señales correspondientes. Se efectuaran una serie de calculos, en tiempo real (RTC), y se modificaran dinamicamente los parametros del sistema anteriormente seleccionados a medida que se realiza el proceso.

En el presente trabajo, todos los procesos de control descritos, salvo el mapeo de superficies mediante el escaner laser, se han llevado a cabo *online*

- Control de proceso *offline*: Se seleccionaran una o mas señales, que seran evaluadas a fin de determinar el cambio de parametros del proceso al que daran lugar, pero todo ello se realizara mientras dicho proceso no se esta llevando a cabo. Debido a la naturaleza del tipo de control de proceso, en este caso no es necesario llevar a cabo los calculos que permiten obtener los nuevos valores de los parametros en tiempo real. La principal desventaja de este tipo de sistema de control es que pueden obtenerse valores de parametros erroneos, debido a que la medida se efectua de modo previo al paso de la herramienta. Las alteraciones dinamicas provocadas por dicha herramienta al efectuar el tratamiento pueden distorsionar los valores de los parametros previamente calculados, ya que cambia el conjunto de condiciones iniciales que dieron origen a esos resultados.

En el presente trabajo, este tipo de control se emplea para controlar en procesos de laser cladding la medida de la altura actual del cordon o la distancia de la herramienta a la superficie, a fin de conocer dichos valores para poder realizar un nuevo tratamiento, partiendo de la pieza en su estado actual, mediante el uso de un escaner laser, que ha probado ser util para la realizacion de estas tareas (ver [20] y [19]). Un buen ejemplo de la desventaja anteriormente comentada es el posible efecto termomecanico causado por la herramienta laser en la superficie, que puede modificar el area cercana por delante de la propia herramienta, antes del paso de la misma, haciendo variar la distancia de esta a la superficie de modo que no coincida con el valor medido previamente.

Ambos procesos, el muestreo de datos y el control del proceso, estan estrechamente relacionados. Esto es asi debido a que como se ha indicado, las señales obtenidas al efectuar el muestreo pueden ser parametros de entrada del sistema de control y, a su vez, la accion del sistema de control modifica las señales obtenidas.

4.1. Muestreo de datos

Esta parte del presente trabajo esta relacionada con el almacenamiento y analisis de las distintas señales de sensores que miden variables del proceso.

La frecuencia de muestreo necesaria para obtener datos significativos se ha seleccionado mediante el analisis de resultados experimentales. Una vez seleccionada la frecuencia minima adecuada, es factible utilizar la señal para evaluar la calidad del proceso, asi como los cambios o inestabilidades que pueden aparecer durante el tratamiento. Este valor de frecuencia minima de muestreo requerida es altamente dependiente de los fenomenos fisicos que gobiernan el proceso, teniendo que ser suficiente como para poder detectar los cambios significativos en la señal. La mayor parte de procesos industriales usando el laser como herramienta estan basados en efectos termicos, produciendose los cambios fisicos del sistema a una velocidad relativamente baja. Se puede indicar de modo general que es posible observar valores de frecuencia de muestreo en un rango que va de los milisegundos a los centenares de microsegundos, puesto que la inercia termica tiende a jugar un importante papel en la evolucion del sistema.

Como ya se ha mencionado, uno de los objetivos del presente trabajo es modificar los procesos a fin de obtener un resultado final de mayor calidad y añadiendo trazabilidad a la cadena completa de fabricacion. Por ello, a fin de facilitar la integracion de esta etapa de muestreo en un proceso industrial real, se hace necesario reducir el numero de muestras y reducir el ruido de la señal, para facilitar y simplificar el tratamiento de datos. Se han propuesto dos metodos clasicos de simplificacion que permiten automatizar el tratamiento de los datos en bruto:

- Se emplea un filtro de media movil de largo M porque es uno de los metodos mas simples para reducir el ruido y el numero de muestras necesarias para definir el sistema. El valor obtenido despues de aplicar el filtro viene definido por la media aritmetica de los M valores medidos anteriores. Este filtro se describe mediante la ecuacion siguiente:

$$y(n) = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} x(n-k)$$

- Se emplea una interpolacion mediante splines cubicas que hace posible el obtener una expresion simbolica o ecuacion que describe el conjunto completo de datos originales y permite estimar cualquier punto no presente en los datos originales pero si perteneciente a la curva. Adicionalmente, es posible obtener las derivadas, y por lo tanto, evaluar como cambia la curva en funcion del tiempo para los diferentes puntos. El proceso de interpolacion se describe a continuacion:

Sea un conjunto de puntos (x_i, y_i) tal que $i = 0, 1, \dots, n$ y cumplen la funcion $y = f(x)$, y se tienen por tanto $n + 1$ puntos y n intervalos distintos.

Sea la interpolacion cubica una combinacion de elementos que forman una curva descrita por tramos, recorriendo el conjunto de puntos descritos. Cada uno de los elementos se describira como:

$$S_i(x) = a_i(x - x_i)^3 + b_i(x - x_i)^2 + c_i(x - x_i) + d_i \quad \forall x \in [x_i, x_{i+1}]$$

En funcion de este resultado, se deduce que para definir la spline $S(x)$, compuesta por n tramos $S_i(x)$, es necesario un conjunto de $4n$ parametros independientes. Partiendo de los criterios que definen la curva deben cumplirse las condiciones siguientes:

- Los extremos de cada elemento deben coincidir con los puntos descritos. Esto asegura la continuidad de la curva por tramos y permite obtener $2n$ restricciones. Se muestra a continuacion la formulacion matematica de la condicion:

$$S_i(x_i) = y_i, \quad S_i(x_{i+1}) = y_{i+1}$$

- La primera y segunda derivada seran continuas en los puntos de union de los tramos, de modo que no haya cambios bruscos en dichas zonas. Dado que solo es de aplicacion en los puntos de union, la aplicacion de esta condicion dara lugar a $2(n - 1)$ restricciones. Se muestra a continuacion la formulacion matematica de la condicion:

$$S'_{i-1}(x_i) = S'_i(x_i), \quad S''_{i-1}(x_i) = S''_i(x_i)$$

- Se hacen necesarias dos restricciones mas para poder calcular los coeficientes. El criterio a emplear depende de la situacion, pero, para el caso de simplificacion tratado, es adecuado dejar libres los extremos de la curva. Se muestra a continuacion la formulacion matematica de la condicion:

$$S''_0(x_0) = 0, \quad S''_{n-1}(x_n) = 0$$

Una vez obtenido el conjunto de restricciones, basta resolver el sistema de ecuaciones para poder definir todos los tramos de la curva.

Aunque es posible refinar este proceso de simplificación empleando métodos más complejos y elaborados, esto queda fuera del alcance de este trabajo, ya que, en primera aproximación, el uso de estos dos criterios basta para evaluar el caso de ejemplo, así como para mostrar que permite la visualización y la obtención de datos cuantitativos de superficies ya tratadas.

4.1.1. Análisis de muestreo en laser cladding

Durante un proceso de laser cladding, un material sufre un proceso de fusión, empleando un laser como fuente de energía para provocar el cambio de estado, y consolidación, debido al enfriamiento que se produce a medida que la herramienta se desplaza hacia otras zonas de la pieza, se trata por tanto de un proceso basado en un efecto térmico.

Desde el punto de vista de la velocidad de la herramienta, los valores típicos son inferiores a 100 mm s^{-1} (en el sistema del caso de ejemplo se han empleado mayoritariamente velocidades del orden de 10 mm s^{-1}).

Se entenderá además que, en este caso, el objetivo de los sensores será medir la temperatura, la aparición de defectos, la calidad general del acabado, los límites de estabilidad para distintos parámetros de trabajo, el nivel de absorción de energía de los distintos tipos de polvo, la forma del cordón y la evolución de estos a medida que se lleva a cabo el proceso, en lugar de analizar los fenómenos físicos que gobiernan el proceso, como serían la dinámica del proceso de solidificación del polvo sobre el sustrato o la velocidad y temperatura de las distintas zonas del metal fundido.

Debido a lo comentado en el párrafo precedente, se puede concluir que para el grupo de sensores que se emplearan para medir el proceso *online* no es necesario emplear una frecuencia de muestreo muy elevada. Empleando el montaje de laser cladding descrito en 2.2 se han llevado a cabo experimentos empleando distintas frecuencias de muestreo, con valores desde 100 Hz hasta 1000 Hz en los sensores cuyos datos se recogen a través de la tarjeta con entradas analógicas y con valores desde 100 Hz hasta 500 Hz en el caso de la cámara CMOS. En ambos casos se ha observado que la frecuencia de muestreo más baja es suficiente para obtener resultados que permiten efectuar un seguimiento adecuado del proceso.

Señal del fotodiodo

La señal obtenida mediante el fotodiodo está relacionada con la temperatura, nivel de absorción de energía del polvo y la forma del cordón, integrando todas ellas en un único sensor. Aunque no es trivial calcular el valor cuantitativo que aporta cada una de las variables al valor total obtenido en cada instante, este puede emplearse para determinar si se produce algún problema durante el proceso, de modo que se reflejara claramente en la señal cuando este se vea alterado. Se enumeran, a continuación, algunos casos en los que se han observado alteraciones:

- Introducir defectos en la superficie del material, mediante ataque mecánico, provoca cambios en la señal al entrar en la zona de ataque. Este efecto se debe, probablemente, al cambio de la reflectividad de la superficie, del ángulo de incidencia del haz laser, del área de interacción con la superficie y de la forma del cordón.
- Alterar la cantidad de polvo proyectado o el tipo del mismo. Este efecto se debe, probablemente, en el primer caso a la diferencia en cantidad de masa a fundir y el tamaño del cordón, en el segundo caso, a las diferencias entre coeficientes de absorción y temperaturas de fusión.

- Modificar el angulo de ataque en la superficie, por ejemplo, proyectando polvo sobre diferentes angulos en un cilindro rotativo. Este efecto se debe, probablemente, al cambio en el angulo de incidencia del haz laser, en la distancia entre herramienta y sustrato y cambios en el comportamiento del metal fundido.
- Alterar la velocidad o potencia del laser. Este efecto se debe, probablemente, a que la cantidad de energia depositada es diferente, obteniendo un cordon de tamaño diferente.

Como se puede observar, existe gran cantidad de informacion en la señal, pero es muy dificil separarla para estudiar el proceso sin recurrir a baterias de experimentos con modificaciones de una unica variable y asi poder medir su efecto. Es, sin embargo, muy util para comprobar, en procesos donde existen parametros de trabajo ya establecidos y se espera cierto resultado, si se produce algun tipo de alteracion. De igual modo, debido a esta combinacion de multiples variables en una unica señal, se ha observado que se comporta muy bien como realimentacion del sistema de control.

Señal de la camara CMOS

La señal obtenida mediante la camara CMOS esta relacionada con la forma de la zona de interaccion laser materia, el ancho del cordon, las trayectorias de las particulas de polvo, la luz reflejada en el area de trabajo, la temperatura y la energia depositada. El fotodiodo contiene la informacion suministrada por la camara, pero integrada, por lo que en este caso se podra obtener mas informacion especifica. Se ha observado que el uso de la camara permite calcular el ancho aproximado del cordon, descubrir que los cambios originados en la señal del fotodiodo se deben a alteraciones geometricas del angulo de la superficie y conocer la direccion de trabajo de la herramienta en cada instante. Aunque tiene un gran potencial para generar informacion util, no se ha explotado todo lo que es posible, por no existir un sistema de filtros e iluminacion adecuados que permitan visualizar areas sobreexpuestas. Tiene ademas un problema adicional, la gran cantidad de informacion suministrada implica que dificilmente se pueda acceder a ella en tiempo real, al menos con los medios disponibles actualmente en el laboratorio, para darle un uso practico en el momento en que es obtenida, siendo mas util para analizar lo que ha sucedido durante el proceso o como afecta una alteracion en los parametros al mismo. Es por esto ultimo que no se contempla como alternativa para realimentar el sistema de control.

Señal del escaner laser

La señal obtenida mediante el escaner laser esta relacionada con la superficie, la reflectividad de la misma y su geometria. Permite medir la pieza tratada antes y despues del proceso, aunque, en ciertas circunstancias, tambien podria hacerlo durante el mismo. Su uso permite conocer los cambios y modificaciones superficiales que se han producido, de modo cualitativo (obteniendo una imagen cenital de la pieza en escala de grises) y cuantitativo (mediante medidas de profundidad/altura).

Debido a las dificultades para medir la pieza a medida que se va procesando, ya que la herramienta de medicion, un laser, se veria afectada por la propia luz del proceso, perjudicando a los resultados, es dificil plantear el uso de la señal obtenida del mismo, un perfil de la superficie, como realimentacion de un sistema de control *online*. Si se ha contemplado, como ya se ha descrito, la posibilidad de usar la señal como sistema de control *offline*, en el caso de tratamientos sucesivos, modificando la distancia, velocidad y/o posicion de la herramienta en funcion de los cambios operados en la geometria.

Es ademas, como se analiza en profundidad en 5, posible utilizar la informacion procedente del escaner para generar un modelo tridimensional de la superficie, que puede ser empleado a la hora de generar trayectorias de modo automatico.

4.1.2. Analisis de muestreo en soldadura hibrida laser-arco

Durante un proceso de soldadura hibrida laser-arco, un material se une con otro mediante la fusion de ambos, empleando material de aportacion y dos fuentes de energia que interaccionan con las superficies a soldar, un haz laser y un arco electrico, solidificandose a continuacion debido al enfriamiento que se produce a medida que la herramienta se desplaza hacia otras zonas de la pieza, se trata por tanto de un proceso basado en un efecto termico.

Desde el punto de vista de la velocidad de la herramienta, los valores tipicos varian en funcion del tipo de soldadura a realizar, siendo el valor maximo del orden de 200 mm s^{-1} (en el sistema del caso de ejemplo se han empleado mayoritariamente velocidades del orden de 35 mm s^{-1}).

En este caso, los experimentos se han llevado a cabo para comprender los fenomenos fisicos que originan determinados resultados, en concreto, la evolucion y comportamiento del metal fundido, asi como los efectos que se producen en el mismo cuando existen alteraciones superficiales de determinado tipo. Estas alteraciones superficiales tendran un impacto en la interaccion entre el laser y el arco que tambien se pretende analizar.

Debido a lo comentado en el parrafo precedente, aun tratandose del estudio de un proceso basado en un efecto termico, para medir el proceso *online* es necesario emplear una frecuencia de muestreo lo bastante elevada como para visualizar los cambios experimentados por el metal fundido durante su proceso de fusion y posterior solidificacion. Empleando el montaje de soldadura hibrida laser-arco descrito en 2.4.2 se han llevado a cabo experimentos empleando distintas frecuencias de muestreo, con valores desde 2000 Hz hasta 3000 Hz en el caso de la camara de alta velocidad. Se ha observado que la frecuencia de muestreo mas baja es suficiente para obtener resultados que permiten efectuar un seguimiento adecuado del proceso.

Señal de la camara de alta velocidad

La señal obtenida mediante la camara de alta velocidad esta relacionada con la evolucion de la zona de interaccion laser materia, el ancho y altura del cordon, las trayectorias de las gotas de material de aportacion, la velocidad del metal fundido y los efectos de combinar la herramienta laser con el arco. El sistema de iluminacion y los filtros instalados en la camara permiten obtener gran cantidad de informacion, ya que hace posible eliminar gran parte de la luz del proceso que, de otro modo, saturaria el sensor. Al igual que en el caso del cladding, la gran cantidad de informacion suministrada implica que dificilmente se pueda acceder a ella en tiempo real, al menos con los medios disponibles actualmente en el laboratorio, para darle un uso practico en el momento en que es obtenida, siendo mas util para analizar lo que ha sucedido durante el proceso o como afecta una alteracion en los parametros al mismo. Es por esto ultimo que no se contempla como alternativa para realimentar el sistema de control.

Señal del cabezal de seguimiento de linea

La señal obtenida mediante este sistema es, a todos los efectos, equivalente a la de un escaner laser y es de aplicacion todo lo descrito para el caso de laser cladding, con la unica salvedad de una limitacion de numero de muestras por ciclo, que puede soslayarse si se asume que es posible realizar pasadas sucesivas para recorrer toda la superficie en caso de no ser de suficiente longitud la primera. En este caso, se ha empleado para evaluar la calidad del resultado y analizar el impacto sobre el proceso de solidificacion del metal fundido que causan las distintas alteraciones geometricas seleccionadas para el experimento.

4.2. Sistema de control

Esta parte del presente trabajo esta relacionada con el uso de las distintas señales de sensores que miden variables del proceso para alterar otras variables de modo controlado, a fin de conseguir un resultado mas homogéneo y repetible. Aunque la Teoría de Control describe multiples métodos y tipos de sistemas de control, en este trabajo se empleara, como ya se ha indicado de modo previo, unicamente un control de tipo Proporcional Integral Derivativo, después de haber comprobado que es adecuado para controlar el proceso estudiado (ver [44], [6], [16]), como se muestra en 7.2, por su simplicidad, facilidad de implementación y robustez. El controlador PID se describe mediante la ecuación siguiente:

$$y(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t)$$

Siendo los valores:

- y : Variable sobre la que se actuara para controlar el proceso. En el contexto de los tratamientos por laser, la mas típica, es la potencia de emisión del mismo, tanto por facilidad a la hora de modificar su valor, normalmente directamente mediante un valor de voltaje entre un rango determinado es la potencia del mismo, como por el gran impacto que tiene su variación el proceso. Otras variables importantes habituales son la distancia de trabajo a la pieza y la velocidad, aunque normalmente establecer un control de las mismas es mas complejo.
- e : Valor de error obtenido a partir de restar la señal de realimentación empleada en el control, esto es, aquella que se pretende llevar a un valor determinado, a la consigna, el valor determinado objetivo que se considere para estabilizar el proceso.
- K_p : Valor proporcional. Es un parametro a ajustar y se trata del que mayor peso tiene dentro de la ecuación, por lo que efectúa la mayor parte de corrección del error. Si es muy alto el sistema se volvera inestable, y si es demasiado bajo, el sistema tardara en alcanzar la estabilidad o no llegara a hacerlo
- K_i : Valor integral. Es un parametro a ajustar y su efecto sera eliminar el error estacionario que se produce cuando solo se emplea el termino proporcional e incrementar la velocidad de subida para alcanzar la consigna, pero con valores demasiado elevados puede llegar a provocar una sobreoscilación
- K_d : Valor derivativo. Es un parametro a ajustar y permite reducir la sobreoscilación inicial, así como minimizar el error segun este se va produciendo, pero a cambio ralentizara la subida No es un valor típicamente utilizado en PID reales, debido a que es muy sensible al ruido

La implementación real del mismo, sin embargo suele estar sujeto a multiples valores correctores, añadidos en función de la tipología del sistema que se pretende controlar. Es por esto que aqui no figura ninguno de ellos, ya que no se puede generalizar su uso hasta haber analizado en profundidad el tipo de sistema y de respuesta que se obtiene en cada caso.

En este caso, dado que se realizara una implementación discreta del mismo mediante el uso de sistemas digitales para la lectura de la señal de realimentación y tratamiento de los datos obtenidos, se empleara el algoritmo siguiente, que permite aproximar la fórmula antes descrita de un modo sencillo:

1. Se asignan valores a K_p , K_i y K_d y se pasa al paso siguiente.

2. Se inicializa el valor de error acumulado $e_{cum} = 0$ y error anterior $e_{prev} = 0$ y se pasa al paso siguiente.
3. Se calcula el valor de error instantaneo como la resta entre el *setpoint* o valor de consigna actual c_{set} y el valor instantaneo de señal de realimentacion x_t , obteniendose entonces que $e_t = c_{set} - x_t$ y se pasa al paso siguiente.
4. Se calcula el nuevo valor de error acumulado, sumandole al valor anterior de error acumulado el nuevo valor de error instantaneo, esto es, $e_{cum} = e_{cum} + e_t$ y se pasa al paso siguiente.
5. Se calcula el nuevo valor de error diferencial e_{dif} , restandole al valor instantaneo de error el valor de error anterior, esto es, $e_{dif} = e_t - e_{prev}$ y se pasa al paso siguiente.
6. Se calcula el valor de salida de la funcion del PID y_t a partir de la siguiente igualdad, $y_t = K_p \cdot e_t + K_i \cdot e_{cum} + K_d \cdot e_{prev}$ y se pasa al paso siguiente.
7. Se actualiza el valor de error anterior con el valor de error instantaneo actual, esto es, $e_{prev} = e_t$ y se pasa al paso siguiente.
8. Se espera el tiempo de muestreo elegido Δt y se comprueba si se ha detenido el sistema de control, en caso afirmativo se termina el proceso, en caso contrario se vuelve al paso tres.

El ajuste de los parametros del sistema de control es una tarea que para ser realizada de modo teorico o mediante simulacion, requiere de un modelo razonable del sistema que se pretende controlar. En caso de no disponer de modelo, el ajuste se realizara de modo empirico, mediante criterios de Ziegler y Nichols o equivalentes. En relacion a las necesidades de frecuencia de muestreo, se generalizara el criterio aplicado para las señales de sensores utilizadas como realimentacion.

Partiendo de la estructura de PID basico descrita, y utilizandola de un modo modular, se pueden describir varios modos de funcionamiento, que pueden combinarse entre si, los cuales se continuacion:

- PID basico actuando de modo individual: Es el modo de uso habitual y mas sencillo, se tiene una unica señal de realimentacion y se procede a controlar una unica variable de salida, bastando un unico modulo PID para su realizacion.
- PID en cascada: Este modo permite enlazar una serie de modulos PID, empleando la salida del primero como entrada del siguiente, teniendo en cuenta que cada uno de ellos tendra asociada una señal de realimentacion distinta. Empleando esta opcion, es posible la integracion de varias señales con distintos pesos en el mismo sistema de control
- PID adaptativo: Este modo permite hacer que el comportamiento global del sistema de control varie en funcion del valor de error que se obtenga, siendo equivalente a tener tantos modulos PID como rangos de error se quieran controlar de modo diferencial, activandose uno u otro en funcion del valor del error instantaneo actual. De modo general, cada modulo tendra parametros distintos, que variaran en funcion del comportamiento pretendido del sistema, siendo tipico emplear valores mas agresivos para fomentar una subida rapida cuando el valor de error es muy grande, y valores que originan una menor variacion de señal, o cambios mas lentos, si el error es pequeño.

Es interesante indicar que es posible habilitar para el elemento hardware descrito en 2.2.12 cualquiera de los modos de funcionamiento anteriormente comentados, siendo necesario realizar pocas modificaciones, o incluso ninguna si el numero de entradas y salidas disponibles en el sistema actualmente son suficientes como para cubrir las necesidades del caso. Alternativamente, podrian conectarse conjuntamente varios modulos equivalentes al actual, funcionando de modo agrupado. Adicionalmente, es un sistema que reduce la dependencia, no necesitando herramientas adicionales (ver [42]) para llevar a cabo el proceso.

4.2.1. Control de lazo abierto para laser cladding

En este caso, el control de lazo abierto se ha limitado a mantener constantes, desde el origen de cada proceso individual hasta su terminacion, los valores de potencia, velocidad de desplazamiento de la herramienta, distancia de trabajo a la pieza, caudal de gas y cantidad de polvo.

De dichas variables, la mas susceptible de ser modificada es la potencia, porque, como se ha indicado que sucede tipicamente en los sistemas laser, se puede ajustar facilmente y de modo casi instantaneo empleando un valor de voltaje. La variacion del caudal de gas y la cantidad de polvo, por la propia mecanica del proceso y el sistema de distribucion empleado, tendra un importante tiempo de retardo. En cuanto a la variacion de velocidad y distancia de trabajo, si se ha propuesto como variable a controlar en este proceso, pero el poder efectuar esos cambios mientras el proceso se lleva a cabo es algo plenamente dependiente del sistema de desplazamiento, y el que se encuentra actualmente en uso no tenia operativas esas opciones en el momento de la realizacion de este trabajo.

Considerando entonces unicamente la potencia como variable a controlar en este caso, se puede decir que para efectuar el control del sistema de cladding en lazo abierto, se han empleado varias alternativas hardware lo largo del tiempo. Tales alternativas se indican a continuacion cronologicamente:

- Uso directo de una salida analogica del robot
- Uso de sistema de control basado en tarjeta NiDAQ (descrito en 2.2.11)
- Uso de sistema de control basado en hardware OSHW (descrito en 2.2.12)

En los dos ultimos casos, el mismo sistema permite el control en lazo abierto y en lazo cerrado de la potencia, empleando como señal de realimentacion la del fotodiodo en el segundo caso.

4.2.2. Control de lazo cerrado para laser cladding

En este caso, debido a las particularidades del proceso, no se ha podido llevar a cabo un ajuste preciso del sistema de control en base a un modelo de comportamiento del sistema basado en la evolucion de la señal del fotodiodo, puesto que este no esta disponible. La obtencion de dicho modelo es compleja (ver [13]) porque partimos de una señal de un sensor que integra la medida de multiples variables, y se desconoce el impacto total de cada una en el resultado.

Adicionalmente, el comportamiento del sistema, debido a la inercia termica del mismo y la corta duracion de los procesos, hace dificil emplear las tecnicas habituales de determinacion empirica de los coeficientes, ya que, en muchos casos, no llega a producirse una estabilizacion de la señal del fotodiodo con un regimen de funcionamiento a potencia constante antes de que el tratamiento de laser cladding finalice.

Aun teniendo en cuenta estas limitaciones, se han obtenido un conjunto de parametros mediante ajuste experimental para algunos casos de ejemplo que, aunque suboptimos, permiten

observar una mejora sustancial de la calidad general y el comportamiento que cabria esperar de un sistema que es susceptible de ser regulado mediante un sistema de control de lazo cerrado (ver casos 7.2.1 y 7.2.2).

Se han realizado varios experimentos para comprobar que tiempo de muestreo es adecuado para actualizar el valor de salida del sistema de control, observandose que, de modo general, basta utilizar un valor de muestreo equivalente al del analisis, del orden de 100 Hz, y aplicar un filtro de media movil de largo $M = 5$ a las señales si estas van a utilizarse como realimentacion para el sistema de control. Estos valores, en cualquier caso, son de aplicacion para los ejemplos desarrollados, pero la aparicion de perturbaciones diferentes a las vinculadas a dichos ejemplos puede obligar a emplear un valor de muestreo muy superior.

En vista de los resultados observados en los experimentos realizados es recomendable tener en cuenta lo siguiente:

- El valor de K_d deberia ser lo bastante pequeño como para tener un impacto reducido porque la señal del fotodiodo es ruidosa, y, en caso de emplear un coeficiente demasiado elevado, el propio ruido podria provocar una oscilacion en la salida del sistema de control.
- Durante el proceso de laser cladding, cuando se inicia, se produce un transitorio durante el cual, el sistema tiene un comportamiento diferente al observado en el regimen continuo. Hay varias causas diferentes que dan lugar a este resultado, la diferencia de temperatura del sustrato, la no presencia de material de aportacion ya fundido, el tener que emplear la energia del laser solo para fundir material y no para mantener el proceso, etc. Seria recomendable, en esta situacion, utilizar un sistema de control mas complejo que un PID basico para tener en cuenta esta diferencia. Por ejemplo, se puede postular el uso de un PID en cascada para tener en cuenta las condiciones de temperatura del sustrato añadiendo un pirometro, y un PID adaptativo para tener en cuenta los regimenes diferentes de funcionamiento (ver [43]).

Capítulo 5

Obtención de modelos de superficies

En este capítulo se describe el modo de obtener, a partir de los datos obtenidos de medir la superficie de la pieza de trabajo, una representación tridimensional de la misma, sobre la que se podrán realizar las trayectorias y el tratamiento laser que proceda. Para ello es necesario llevar a cabo los siguientes pasos:

- Seleccionar una herramienta que haga posible medir cada uno de los puntos de la superficie con una precisión mayor de la requerida para llevar a cabo el procedimiento seleccionado. En el caso que emplearemos como ejemplo en este trabajo, dicha herramienta es un escaner laser, que como se ha descrito previamente, por las características del proceso de laser cladding, es adecuado para ser utilizado en trabajos llevados a cabo con esta técnica.
- Colocar la herramienta de medición en un sistema de traslación con una tasa de repetibilidad y precisión adecuados, de modo que no tengan un gran impacto en los valores obtenidos, y cuyo sistema de referencia sea conocido y fácil de relacionar, mediante el uso de un único sistema de referencia absoluto, con el del sistema de traslación que se encargara de mover la herramienta que llevara a cabo el procesamiento de la pieza. En condiciones ideales, salvo que por su peligrosidad para la integridad de la herramienta lo impida, o problemas físicos (falta de capacidad de carga suficiente, dificultades en la medida por falta de alcance y/o posibles choques de las herramientas con la pieza, etc...) lo más adecuado sería utilizar el mismo sistema de traslación para mover ambas herramientas, a fin de evitar tener que controlar dos elementos diferentes y obtener un comportamiento equivalente del mismo a la hora de realizar ambos procesos. En el caso que emplearemos como ejemplo en este trabajo, el escaner laser de línea se encuentra acoplado en el brazo del robot, junto con el cabezal de cladding, por lo que ambos elementos comparten el mismo sistema de referencia absoluto común del sistema de traslación, respecto del cual se referenciarán sus respectivos orígenes de coordenadas.
- Desplazar la herramienta de medición sobre la pieza o elemento a tratar, a fin de obtener el valor de altura de la misma en cada uno de los puntos de la superficie, siendo necesario a su vez obtener la posición de dichas alturas en relación al sistema de referencia de la herramienta. En general, las herramientas de medición solo permiten obtener una serie de medidas discretas de una parte pequeña de la pieza, por lo que el resultado final obtenido será una nube de puntos, estando sus elementos constituyentes descritos en un sistema cartesiano tridimensional con coordenadas (x_s, y_s, z_s) . En aquellos casos en que un único movimiento no es suficiente para obtener los datos de la superficie completa debido al tamaño de la misma, es necesario realizar múltiples desplazamientos de la herramienta, generándose un conjunto de nubes de puntos, que es conveniente que se solapen para facilitar su unión. En el caso de ejemplo, el escaner obtiene un perfil bidimensional de

comprobado sin embargo que la informacion tipica proporcionada es la intensidad de luz reflejada por la superficie y una serie de alturas medidas a lo largo de una linea, lo que es equivalente a un perfil bidimensional formado por un numero determinado de puntos con coordenadas XZ referidas al sistema de referencia de la propia herramienta.

- Metodo de almacenamiento y tratamiento de datos, que permitira guardar la informacion procedente de la herramienta a medida que esta se vaya obteniendo, junto con los datos necesarios para generar la nube de puntos una vez ha terminado el envio por parte de la herramienta.

A efectos del modulo, la cantidad de informacion minima necesaria que debe ser almacenada es la siguiente:

- Los parametros que permiten describir univocamente la trayectoria rectilinea que sera descrita por la herramienta de medida, esto es, punto inicial y final, orientacion de la herramienta, velocidad, aceleracion y deceleracion, descritas en el sistema de referencia absoluto
- Marca de tiempo de inicio del desplazamiento de la herramienta de medida
- Marca de tiempo de inicio de recepcion de datos de lectura (se asume que no existe un retardo apreciable entre la medida y la recepcion de la misma)
- Valor de frecuencia de lectura del escaner o marca de tiempos de recepcion de lectura (se asume que no existe un retardo apreciable entre la medida y la recepcion de la misma)

Con esta informacion es posible determinar la posicion y orientacion de la herramienta respecto de la superficie asociada a cada una de las mediciones realizadas. Siendo conocida la relacion entre el sistema de referencia de la herramienta y el sistema de referencia absoluto, es posible calcular, a partir de la posicion y orientacion de la herramienta, las coordenadas XYZ de cada uno de los puntos obtenidos en el sistema de referencia absoluto. El procedimiento de obtencion de la matriz de transformacion que permite efectuar el cambio de sistema de coordenadas se indica mas adelante.

Como alternativa al calculo cinematico de las posiciones de la herramienta, es factible, aunque mas lento, desplazar la herramienta de medida a una posicion determinada, y, una vez alcanzada, almacenar dicha posicion, medir las distancias consideradas, repitiendo el proceso hasta cubrir la superficie completa con el grado de precision requerido.

En lo que se refiere al ejemplo que se describe en este trabajo, el modulo emplea un socket para establecer la comunicacion con el escaner y capturar los paquetes TCP/IP con la informacion de cada uno de los perfiles del escaner, procesandola y almacenando el momento de su recepcion, los datos adicionales indicados, que permiten determinar la posicion instantanea del escaner en el sistema de referencia absoluto del equipo para dicho instante y, por tanto, obtener el valor de la coordenada XYZ en que esta situado el plano que contiene el perfil actual, la reflectividad y posiciones XZ de cada uno de los 256 puntos que conforman el rango de la herramienta. Los datos guardados pueden ser procesados para generar una vista tridimensional de las superficies que conforman la pieza, asi como para medir la altura de los distintos puntos que la forman, o bien, se puede obtener una imagen de la superficie a partir de los valores de reflectividad en la que se puede localizar la zona a tratar.

5.2. Determinación de la posición del sistema de referencia de la herramienta respecto del sistema absoluto del equipo

Una vez mas, es difícil generalizar el proceso para todos los casos posibles, debido a las múltiples alternativas que podrían darse. El procedimiento general para el caso particular de la herramienta de medida incorporada en el propio equipo desplazador, de modo que acompañe al útil de trabajo, pasa por efectuar una transformación de coordenadas que tenga en cuenta la posición de la herramienta con respecto al sistema de referencia absoluto del equipo y la orientación de los ejes de la herramienta (en general, con el valor Z invertido con respecto al valor típico del sistema de referencia absoluto debido a su posición de trabajo). El proceso de cálculo de la matriz que permite realizar la transformación indicada es análogo al descrito en el capítulo de Generación de Trayectorias para obtener la transformación para el útil de trabajo.

Se describe a continuación el proceso desarrollado para obtener los datos necesarios para calcular la matriz descrita en el caso de ejemplo.

5.2.1. Caso particular: Determinación de la posición del sistema de referencia del escáner MEL respecto del sistema absoluto del robot

El escáner se fija a la placa de aluminio que se encuentra entre la brida del robot y el cabezal láser. Esta chapa está girada 180 grados alrededor del eje z de la muñeca respecto de la posición dibujada en la figura del cabezal. En el extremo de la placa anterior se coloca a 90° se coloca una segunda placa de aluminio. A 90° de la segunda y paralela a la primera se encuentra la tercera placa que es donde se sujeta el escáner. Según las cotas de los plano, la posición del origen de coordenadas del escáner S respecto del centro de la brida D en coordenadas del sistema de la brida serían:

$$ES_{x6} = (-55) + (0) + (227) + (-56 + 73,5 - 3 + 90) = 276.5 \text{ mm} = -ES_{z0}$$

$$ES_{y6} = (65 - 280 + 5) + (0) + (-60) + (11,5) = -258.5 \text{ mm} = ES_{y0}$$

$$ES_{z6} = (10) + (W) + (10) + (25) = W + 45 \text{ mm} = ES_{x0}$$

5.3. Interpolación de puntos a distancias uniformes

Este paso es requerido únicamente si la herramienta empleada para realizar las mediciones de superficie es un sistema láser de línea, puesto que, debido al método empleado para efectuar la medida, en la mayor parte de equipos de este tipo, el haz láser tiene forma de abanico de modo que la distancia sobre el eje X de los puntos del perfil varía con Z , desde un valor mínimo $xrange_{min}$ en el origen, en el caso del escáner empleado en el ejemplo $xrange_{min} = 30 \text{ mm}$ para $Z = 0$, hasta un valor máximo $xrange_{max}$ en el límite de altura medible, en el caso del escáner empleado en el ejemplo $xrange_{max} = 40 \text{ mm}$ para $Z = 75 \text{ mm}$.

Aunque los valores proporcionados por el escáner de modo general tienen en cuenta este efecto y ya están corregidos, devolviendo el valor real de medida en función de la altura a la que se obtiene, esto hace que la distribución de puntos no sea totalmente uniforme en el plano XZ y genera una nube de puntos no homogénea. Adicionalmente, es posible que provoque desviaciones en la representación de la superficie si se emplea directamente el valor de reflectividad de cada punto como valor de pixel.

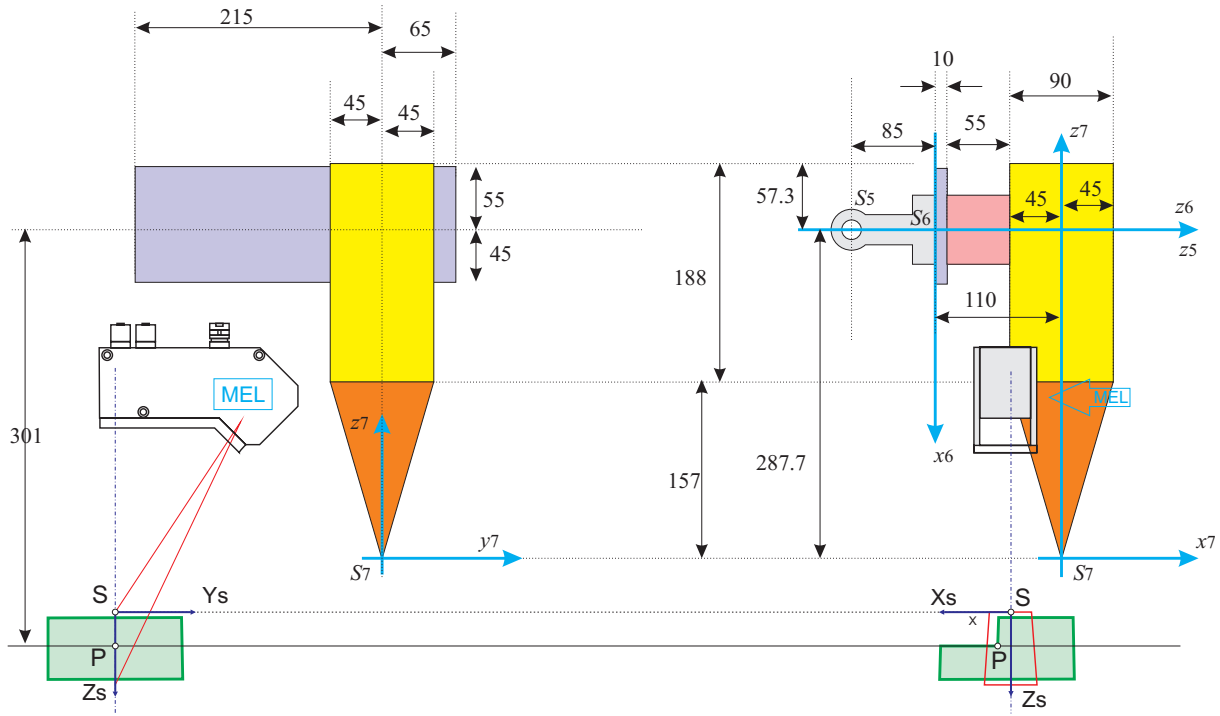


Figura 5.2: Posición del escáner en el sistema de coordenadas de la brida para herramientas S_6 .

Para corregir este efecto y conseguir una distribución de puntos uniforme en los perfiles es necesario tomar un segmento, que llamaremos de interpolación, de tamaño d_T , siendo $xrange_{max} \geq d_T \geq xrange_{min}$ y cuyo punto medio coincida con el origen del sistema de coordenadas del escáner $O_S = (0, 0)$. En función del número de puntos máximos del perfil n_{pts} , dicho segmento se dividirá en $n_{int} \leq n_{pts} - 1$ tramos iguales, cuyos extremos definirán el valor x_{int} de cada uno de los nuevos puntos interpolados P_{int} en el eje X . El valor z_{int} de estos nuevos puntos en el eje Z se puede calcular de dos modos distintos:

- Proceso de interpolación lineal: No es necesario que exista un alto grado de continuidad en la superficie, siendo tolerante a huecos o ausencia de puntos. Adicionalmente, cada una de las interpolaciones será independiente del resto y siempre estarán basadas en medidas reales de la herramienta.

El procedimiento a seguir para obtener los puntos interpolados se basa en el cumplimiento de alguna de las siguientes condiciones para cada uno de los valores de x_{int} :

- Si el valor x_{int} cumple que $x_j < x_{int} < x_{j+1}$, siendo x_j y x_{j+1} las coordenadas en el eje X de dos puntos sucesivos del perfil original $P_j = (x_j, z_j)$ y $P_{j+1} = (x_{j+1}, z_{j+1})$, así como que $|x_j - x_{int}| \leq xrange_{max}$ y $|x_{j+1} - x_{int}| \leq xrange_{max}$, se podrá utilizar la línea que une P_j y P_{j+1} para interpolar el valor de z_{int} según la ecuación de la recta:

$$z_{int} = z_j + (z_{j+1} - z_j) \frac{x_{int} - x_j}{x_{j+1} - x_j}$$

- Si el valor x_{int} cumple para cierto valor de x_j que $|x_j - x_{int}| \approx 0$, se puede considerar que $P_{int} = P_j$
- Si se cumple que $|x_j - x_{int}| \leq xrange_{max}$ y $|x_j - x_{j-1}| \leq xrange_{max}$, o bien $|x_{j+1} - x_{int}| \leq xrange_{max}$ y $|x_{j+1} - x_{j+2}| \leq xrange_{max}$, se puede considerar extender la línea que une P_{j-1} y P_j , o bien P_{j+1} y P_{j+2} hasta alcanzar el valor de x_{int} , realizando a continuación una interpolación lineal como la indicada en el primer supuesto.

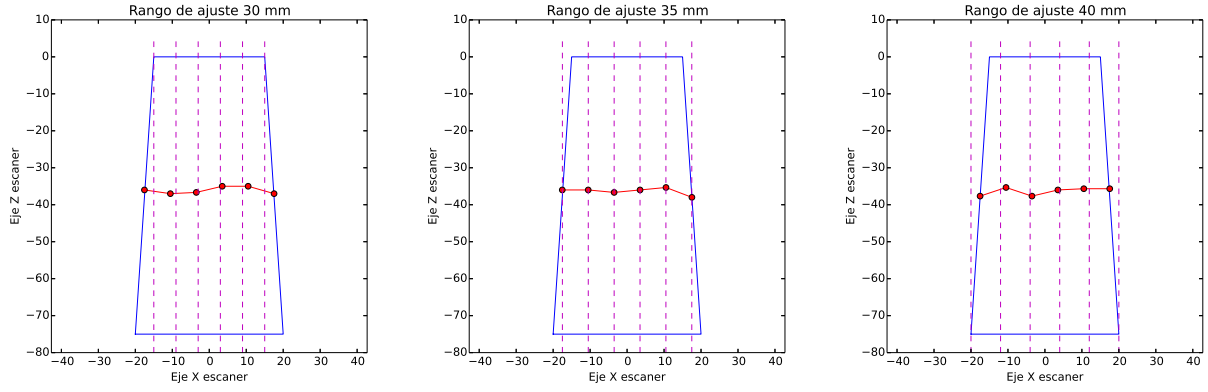


Figura 5.3: Distintas alternativas de distribucion de distancias uniformes, donde los puntos de interpolacion coinciden con el corte de las lineas verticales y el perfil original. Se observa que solo la distribucion de tamaño equivalente al rango de medida minimo de la herramienta asegura obtener un conjunto de puntos completo para todo el rango de Z cuando la superficie es medible a lo largo de todo el perfil

En general no se recomienda realizar esta operacion, salvo que el perfil original tenga pocos cambios de pendiente, siendo estos ademas de pequeña magnitud, y siendo cierto que $|\mathbf{P}_{int}\vec{\mathbf{P}}_j| \ll |\mathbf{P}_{j-1}\vec{\mathbf{P}}_j|$ o $|\mathbf{P}_{int}\vec{\mathbf{P}}_{j+1}| \ll |\mathbf{P}_{j+1}\vec{\mathbf{P}}_{j+2}|$, segun el caso. Aun en el supuesto de que se cumplan estas condiciones, efectuar esta aproximacion puede dar lugar a un punto que no se corresponda en modo alguno con la superficie real, por lo que resulta conveniente, en este caso, revisar los resultados obtenidos para evitar introducir valores erroneos en la nube de puntos.

- Si no se cumple ninguno de los supuestos anteriores, cabe considerar que el punto no estara disponible, por lo que no se incluire en el perfil de puntos interpolados ningun punto para el valor x_{int} actual.
- Proceso de interpolacion por aproximacion de curva tipo spline: Si se puede asegurar que existe un grado de continuidad elevado en la superficie, asi como cambios suaves en la pendiente, como en los casos de una superficie alabeada o un cordón de soldadura entre dos chapas planas, es factible emplear los puntos del perfil para obtener una curva que la aproxime de tipo spline y, a partir de su ecuacion descrita como $Z(X)$, determinar los valores de cualquier punto de dicha curva.

El procedimiento a seguir para generar la curva es el siguiente:

- Se realizara un suavizado de los datos de origen a fin de eliminar los valores atipicos o *outliers*, probablemente causados por ruido o reflejos debidos a las propiedades y geometria de la superficie. Esto es necesario porque, al efectuar el ajuste estos valores podrian provocar una importante perdida de precision, ya que la presencia de un punto erroneo que va a ser utilizado en la generacion de la curva dara lugar a una perturbacion no solo en la posicion de dicho punto, si no tambien en su entorno, puesto que puede alterar notablemente la pendiente de la spline, tanto aguas arriba como aguas abajo de la misma.
- Una vez obtenidos los nuevos datos suavizados, se procedera al calculo de la spline cubica que pasa por todos los nuevos puntos, o bien que emplea simplemente como nodos. No se tratara aqui la resolucion del problema de como generar la spline, ya

que existen multiples librerias, para diversos lenguajes, que cubren este particular y no es, ademas, la solucion empleada de modo primario en el caso de ejemplo tratado.

- Con la spline definida, basta calcular los valores z_{int} que se obtienen al introducir como parametros los valores x_{int} , quedando definidos los puntos interpolados P_{int}

Alternativas al uso de las curvas spline son el uso de polinomios de grado elevado o emplear tecnicas estadisticas como la de la regresion local (LOESS/LOWESS) para obtener una aproximacion del perfil, aunque no seran tratadas aqui en profundidad por exceder el alcance de este trabajo.

Esta metodologia se ha probado y utilizado para analizar superficies, como se describe en el capitulo dedicado a ejemplos, pero no se ha integrado en la aplicacion de modo generico, porque, en la forma que se emplea actualmente, requiere un alto grado de interaccion con el usuario y, por tanto, conocimientos relativos al calculo de las propias curvas, minimos locales, etc. Esto impide el uso de dicha metodologia, hasta una nueva revision que evite esta serie de procedimientos manuales, como un metodo sencillo y automatizado que sustituya y/o complemente al anteriormente descrito.

El valor de reflectividad para los puntos interpolados I_{int} se puede calcular de modo analogo al de la coordenada en el eje Z , sin mas que sustituir los valores de reflectividad del punto o puntos empleados para realizar la interpolacion en las ecuaciones previas. Esto permitira obtener una imagen que mantiene la proporcionalidad y sobre la que es posible establecer relaciones, al menos en uno de los ejes, o en ambos si se selecciona la velocidad de escaneo para que la distancia entre perfiles l_p sea tal que $l_p = \frac{d_T}{n_{int}}$, y por lo tanto se obtenga una nube de puntos cuyas proyecciones en el plano XY sean equidistantes.

Aunque reduce el rango de medida de la herramienta, para asegurar de modo general que es posible interpolar el mayor numero de puntos posibles es necesario que se empleen los valores $d_T = xrange_{min}$ y $n_{int} = n_{pts} - 1$, puesto que, en otro supuesto, el perfil original podria llegar a ser mas corto que el segmento de interpolacion, dando lugar a puntos no existentes, sobre todo en los extremos. Esta opcion es la mas conservadora y puede ocasionar se consuma mas tiempo en llevar a cabo los procesos de medicion, al hacerse necesario realizar un mayor numero de pasadas de escaneo para poder obtener el modelo de la superficie completa.

En el caso de ejemplo, dado que d_T es parametrizable, se han probado diferentes valores, concluyendose que, en general, es posible emplear una distancia entre puntos interpolados de 0.015 mm por no ser critico el tiempo de medida para el tratamiento (lo que implica que no es necesario maximizar la velocidad y ancho de las pasadas) y realizar normalmente el escaneo de piezas de poca altura y cuya superficie tiene cambios de pendiente poco acusada (lo que permite utilizar un rango de alturas de la herramienta lo bastante estrecho como para aprovechar la zona proxima al limite superior del eje Z , que a su vez es la que tiene un mayor rango de medida en el eje X)

5.4. Superposicion de pasadas de escaneo

En el caso de emplear una herramienta de medida que obtiene un perfil de alturas en el plano XZ , y para tener la posibilidad de escanear superficies contenidas en un rectangulo que se construye a partir de los puntos limite $P_{min} = (x_{min}, y_{min}, z_{min})$ y $P_{max} = (x_{max}, y_{max}, z_{max})$ de tamaño mayor que el rango de medida $xrange_{typ}$ del escaner en el eje X , es posible realizar un conjunto de n_{bar} barridos a lo largo del eje X . Considerando un grado de solape δ , a fin de permitir tener redundancia entre ambas medidas para poder facilitar su union y eliminar posibles puntos no validos, se tendra que $n_{bar} = \lceil \max(\frac{|x_{max}-x_{min}|}{xrange_{typ}(1-\delta)}) \rceil$.

A mayores, se han hecho las consideraciones siguientes:

- Se considerara que los perfiles se obtendran para todas las pasadas en la misma secuencia de coordenadas del eje Y , lo cual permite que sea posible concatenar los planos XZ de dichas pasadas sin realizar operaciones adicionales. Al haber realizado previamente la interpolacion de puntos a distancias uniformes, es necesario utilizar el mismo criterio de seleccion de distancia para todos los escaneos y seleccionar un valor de δ que cumpla que el desplazamiento relativo de la herramienta entre pasadas sucesivas en el eje X sea multiplo de la distancia establecida entre dos puntos consecutivos del perfil.

En caso de que no se tomaran los perfiles de escaneos sucesivos en la misma secuencia de coordenadas del eje Y , seria necesario seleccionar una secuencia de valores equidistantes dos a dos y_{u_i} para las coordenadas del eje Y y realizar una interpolacion entre perfiles consecutivos y_j y y_{j+1} , tales que $y_j < y_{u_i} < y_{j+1}$ para cada una de las pasadas. Este procedimiento no se describira en detalle, por no ser un caso considerado en este trabajo, pero implica un proceso previo de interpolacion de puntos a distancias uniformes de los dos perfiles originales, a fin de asegurar que, si existen elementos que interpolar en dichos perfiles, estos se encuentren en el mismo plano XY , y se pueda realizar la operacion linealmente. Existen alternativas mas complejas basadas en la obtencion de una serie de ecuaciones que permitan definir la secuencia de perfiles como una NURBS, pudiendo en este caso obtener directamente el valor de altura de cualquier punto de la superficie a partir de sus coordenadas x e y , pero el estudio realizado por el autor de las mismas para este trabajo no ha sido lo bastante amplio como para postularlo como solucion general.

- Se considerara que las pasadas se realizan sin errores de precision de importancia en el posicionamiento de la herramienta. Esto implica que las coordenadas medidas se consideraran ciertas por defecto y es posible colocar de modo directo las secuencia de pasadas en el espacio en relacion a las demas sin necesidad de comprobacion.

En caso de que no se pudiese asumir esto como cierto, seria necesario efectuar un paso previo de busqueda de puntos de referencia en la zona de solape, de modo que pudiesen emplearse como anclas, para determinar el grado de diferencia existente entre la posicion en la pieza real de la pasada y el valor medido, y una vez establecido y cuantificado, poder efectuar una correccion mediante una traslacion y un giro. En el caso de ejemplo, debido al grado de precision requerido y al ofrecido por el sistema de traslacion, no ha sido necesario efectuar este tipo de comparaciones, por lo cual no se detallara la mecanica del proceso.

Una vez realizadas las n_{bar} pasadas, se procedera a superponerlas de modo incremental. Para ello se llevaran a cabo los siguientes pasos:

- Union de puntos contenidos en area de solape: Se buscaran el conjunto de puntos de la pasada b_j y de la pasada b_{j+1} , que esten contenidos en el area de solape compartida, y se agruparan para su tratamiento posterior. Si se han respetado los criterios establecidos, y considerando que se trata de perfiles con distribucion uniforme de puntos, este proceso es inmediato, ya que la proyeccion en el plano XY de los puntos contenidos en la zona de solape de dos pasadas de escaneado coincide directamente, encontrandose los puntos adscritos a unas coordenadas fijas y conocidas.
- Transformacion de puntos agrupados: Una vez obtenidos todos los elementos de las dos nubes de puntos vinculados a la zona de solape actual, pueden darse tres situaciones distintas para cada posicion (x_i, y_i) del plano XY susceptible de contener puntos:
 - Presencia de dos puntos $P_A = (x_i, y_i, z_a)$ y $P_B = (x_i, y_i, z_b)$, cada uno de ellos perteneciente a una de las nubes de puntos originales. El tratamiento de este caso variara en funcion de la distancia entre los puntos:

- Si $|z_a - z_b| \approx 0$, se puede considerar que el valor final del punto en la posición actual será $P_N = (x_i, y_i, \frac{z_a + z_b}{2})$. En el caso en que los puntos lleven asociado valor de reflectividad, también se hará la media de dichos valores para determinar el nuevo valor asociado a P_N
- Si $|z_a - z_b| \gg 0$, uno de los puntos es no válido. Salvo casos particulares, para determinar cuál de ellos es el incorrecto es necesario comparar ambos puntos con los puntos más próximos de su perfil de procedencia y, suponiendo que $z_{a-1} \approx z_{b-1}$ y $z_{a+1} \approx z_{b+1}$, se puede considerar que:

$$P_N = \begin{cases} P_a, & |z_a - z_{a-1}| + |z_{a+1} - z_a| < |z_b - z_{b-1}| + |z_{b+1} - z_b| \\ P_b \end{cases}$$

Si no se cumpliera el criterio de $z_{a-1} \approx z_{b-1}$ y $z_{a+1} \approx z_{b+1}$, o bien por ser al menos uno de ellos un punto no presente o, por ser al menos uno de ellos no válido, se tendrá que recurrir a otros métodos complejos, que no garantizan un resultado correcto en ciertos casos particulares, pero funcionan de modo general. Una alternativa es construir un círculo de radio superior a la distancia media entre puntos del perfil, un valor típico de podría ser el triple de la distancia uniforme entre puntos en el eje X , para luego comprobar el número de puntos que aparecen contenidos en el mismo, teniendo en cuenta que se considerará como válido el punto situado en el centro de la circunferencia que más puntos contenga. Este criterio puede fallar en zonas como esquinas o donde la pendiente cambia bruscamente, pudiendo, en caso de que existan múltiples puntos no válidos, llegar a validar el incorrecto.

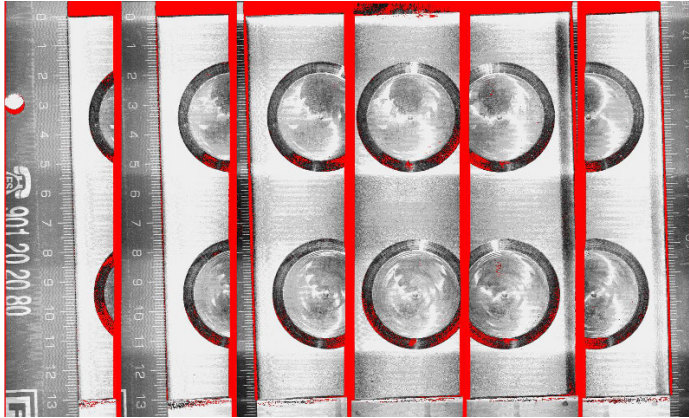
Otra alternativa es comprobar, en el entorno del punto, como varía la pendiente y en qué grado. Es típico que los puntos no válidos causen la aparición de un cambio de pendiente brusco seguido por otro de signo opuesto y valor similar rápidamente, mientras que, salvo que se trate de una esquina o saliente estrecho, esto no es algo que suceda habitualmente en la geometría de una pieza. Si esto sucede en uno de los puntos, se considerará como válido aquel en que no se de el cambio brusco de pendientes. Al igual que en la alternativa anterior, este criterio puede fallar en zonas como esquinas o donde la pendiente cambia bruscamente, pudiendo, en caso de que existan múltiples puntos no válidos, llegar a no poder validar el correcto.

Finalmente, y aunque no se recomienda, puede calcularse la media entre los puntos como en el caso previo, siempre y cuando posteriormente se lleve a cabo el proceso de búsqueda y eliminación de puntos no válidos, ya que, en la mayoría de los casos todavía aparecerá como punto no válido y será corregido. Proceder de este modo, reduce la complejidad del proceso, pero existen dos problemas fundamentales en el uso esta aproximación, el primero es que dependiendo de la geometría de la pieza puede llegar a ocurrir que no sea considerado como un caso no válido (los puntos no válidos tienden a aparecer como valores cercanos al valor límite de precisión del sistema, por lo que si la parte de la pieza en la que aparecen los puntos no válidos estuviese relativamente próxima a dicho límite, podrían llegar a cumplir el criterio de punto válido), el segundo es que, aun en el caso de ser considerado no válido, se calculará el valor del punto de modo estimado, mientras que si se emplean los valores medidos reales y uno de ellos es realmente válido, se puede llegar a perder precisión por no emplear la información original.

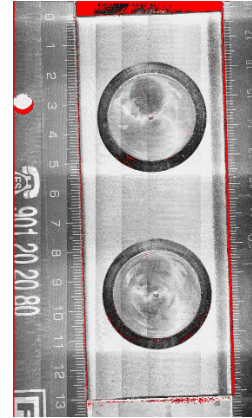
- Presencia de un único punto $P_k = (x_i, y_i, z_k)$, perteneciente a cualquiera de las dos

nubes de puntos originales. En este caso, se utilizara directamente el punto como valor final en la nueva nube de puntos, $P_N = P_k$. Esta situacion se dara cuando, para la posicion actual (x_i, y_i) en una de las pasadas, no haya un punto presente, pero si en la otra.

- Ausencia de puntos en las coordenadas (x_i, y_i) . En este caso, al igual que en las dos nubes de puntos originales, no habra un punto presente en la nueva nube de puntos.



Secuencia de pasadas con solape



Resultado de union de las pasadas

Figura 5.4: Ejemplo de secuencia de pasadas solapadas realizadas sobre una pieza de tamaño mayor que la resolucion del escaner y el resultado de su union. Se puede observar como la presencia de puntos no validos y no presentes (representados en rojo) disminuye notablemente en el resultado final gracias al proceso de solape.

Se ha considerado para el procedimiento que todas las mediciones se han tomado a la misma altura z_M y sentido. En caso de que no se den estas circunstancias, el problema es mas complejo pero las tecnicas comentadas anteriormente son validas para afrontarlo, sin mas que realizar ciertos ajustes o modificando ligeramente las operaciones a llevar a cabo. Se comentan a continuacion las tipologias de problema que pueden surgir con mas frecuencia en piezas reales.

- Superposicion de nubes de puntos tomadas con diferente altura o sentido: En principio, si se respetan las distancias uniforme entre puntos de las pasadas para el plano XZ y las posiciones en el eje Y a la hora de efectuar las mediciones, el metodo de trabajo no sufre variacion. Basta corregir la altura segun la trayectoria de desplazamiento a una altura superior, o tener en cuenta que el recorrido en la direccion del eje Y se realiza en orden inverso, proceso que ya se realiza automaticamente durante la obtencion de los perfiles. Las pasadas de escaneo a diferentes alturas son necesarias cuando la superficie de la pieza tiene desniveles superiores al rango de medida en el eje Z del escaner, mientras que la realizacion de mediciones en sentido inverso puede darse en casos en que aparezcan sombras en la pieza, como se explicara mas adelante.
- Superposicion de mas de dos nubes de puntos en misma area de solape: Deben tratarse por separado las zonas en las que existan combinaciones distintas de solapes, es decir, si tres pasadas originan un solape de todas ellas, uno de la primera con la segunda, uno de la primera con la tercera y otro de la segunda con la tercera, es necesario desagregar las cuatro y tratarlas por separado. En este caso de mas de dos nubes de puntos en la misma area, si se respetan en todas ellas las distancias uniforme entre puntos de las pasadas para el plano XZ y las posiciones en el eje Y a la hora de efectuar las mediciones, basta realizar la superposicion de nubes empleando el criterio descrito, segun su orden de aparicion y

utilizando el resultado de las uniones previas para efectuar la union con las siguientes, es decir, si existiesen cuatro pasadas con solape, se efectuaría la union de la primera con la segunda, posteriormente se efectuaría la union de la tercera con el resultado de la union de la primera con la segunda, luego la union de la cuarta con el resultado de unir la primera union realizada con la tercera, y así sucesivamente, si existiesen mas solapes.

- Superposicion de nubes de puntos tomadas con la herramienta de medida en direcciones distintas: En este caso, se procedera a agrupar las pasadas en funcion de la direccion en que se hayan realizado, y se procedera a calcular, tanto los puntos interpolados de las mismas como las uniones entre pasadas, obteniendose de modo independiente para cada uno de los grupos una nube de puntos. Una vez obtenido el conjunto de nubes de puntos asociada a cada una de las direcciones consideradas, se tomara la de mayor tamaño y la separacion uniforme de sus puntos se empleara para generar una rejilla de referencia de tamaño tal que contenga al grupo completo de nubes de puntos, haciendola coincidir con la nube de puntos que la origina, de modo que los puntos de la misma ya se encuentren colocados correctamente en ella. Una vez definida la rejilla, se recalcularan los puntos de la misma que esten contenidos en mas de un area al mismo tiempo. Para ello sera necesario obtener el valor para los mismos en cada nube de puntos, teniendo en cuenta que, una vez obtenidos se aplicara la metodologia habitual anteriormente descrita para quedarse con el valor mas adecuado. Existen varios modos de obtener una aproximacion de dichos puntos, siendo la mas sencilla, aunque no mas precisa, determinar, para cada uno de ellos, el conjunto de tres puntos de la nube que define el triangulo que los contiene y, mediante la ecuacion del mismo, obtener el valor de altura estimado en la nube de puntos para las coordenadas descritas. La precision obtenida a partir del metodo de ajuste mediante un triangulo puede no ser suficiente en funcion del tratamiento que vaya a realizarse sobre la superficie, teniendo entonces que recurrir a otros metodos de determinacion mas complejos que no se detallaran aqui e implican la conversion de la nube de puntos a curvas.

Existe un caso particular que no requiere aproximacion alguna posterior al calculo de las nubes de puntos con direcciones distintas. Si se cumple que la direccion sea perpendicular entre pasadas, la distancia entre puntos en el eje X e Y sea la misma e igual en todas las nubes de puntos y la posicion de comienzo de las nubes de puntos agrupadas sea compatible con la rejilla de referencia, coincidiendo los puntos con posiciones de esta.

- Superposicion de nubes de puntos tomadas desplazando y rotando la superficie: En este caso, se calcularan las nubes de puntos para cada una de las nuevas posiciones de la pieza, aplicando a continuacion la transformacion que permite colocarlas todas en el mismo sistema de referencia, procediendo a continuacion como en el caso previo. Para obtener la matriz que permite cambiar el sistema de referencia, el valor de desplazamiento y rotacion deben ser conocidos y estar referenciados al sistema de coordenadas absoluto que se desee emplear. Este tipo de desplazamientos y giros se llevan a cabo de modo general para evitar zonas de sombras en las piezas, como se describe mas adelante.

En el caso de ejemplo se han hecho pruebas con un sistema externo de ejes para llevar a cabo este proceso, pero todavia no esta implementado su funcionamiento autonomo en la herramienta software, dependiendo la etapa de conversion del usuario.

5.5. Aproximacion de puntos no validos o no presentes

Debido a las limitaciones de la tecnica y la herramienta, es posible que exista un numero no despreciable de puntos no validos o no presentes en la nube de puntos obtenida. Los puntos

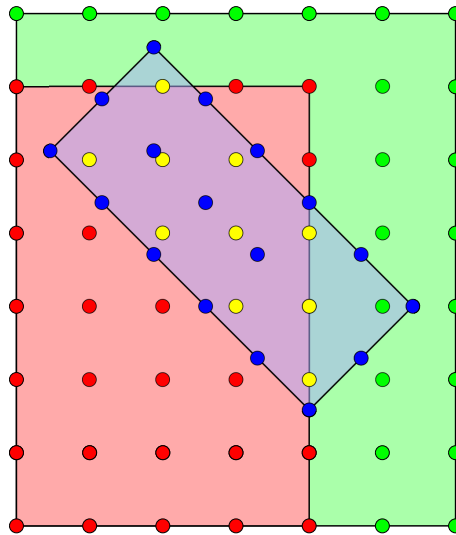


Figura 5.5: Ejemplo de capas tomadas en direcciones distintas. La primera (en rojo) es mayor que la segunda (en azul) y, por tanto, se emplea la primera como referencia para construir la rejilla que cubre a ambas (en verde). Se muestran igualmente los puntos a aproximar, comunes a ambas capas (en amarillo)

no validos existen en la nube de puntos pero su magnitud en el eje Z no es coherente con la superficie circundante, tienden a ser artefactos originados durante la medida por causas diversas. Estos puntos, de ser usados para generar trayectorias, pueden dar lugar a saltos en el desplazamiento, que alejaran la herramienta de la superficie real, provocando posibles defectos o desperfectos en la pieza, por ello es necesaria su eliminacion, y es conveniente que se realice automaticamente. Los pasos para llevar a cabo este proceso de aproximacion se describe a continuacion:

- Búsqueda de puntos no validos, que se lleva a cabo mediante un filtrado en que se marcaran los valores de altura muy elevados o sin valor de reflectividad (en caso de que la hubiese) y metodos estadisticos para comprobar si existe un conjunto de puntos por encima o por debajo de los limites tipicos de la pieza. En caso de tener que localizar los puntos no presentes en la superficie, basta comprobar si en las coordenadas previstas existe o no un punto.
- Analisis de la superficie del entorno de puntos no validos o no presentes, nos permitira determinar si un punto asignado a esta categoria se encuentra realmente dentro de ella o no, asi como establecer si es factible estimar el valor del mismo
- Calculo de estimacion de altura de puntos no validos o no presentes y sustitucion de los mismos en la nube de puntos

A continuacion, a efectos de complementar la lista de pasos anterior, se describen parte de las operaciones asociadas a algunos de los pasos basicos con mas detalle

5.5.1. Búsqueda de puntos vecinos a puntos no validos o no presentes

Una vez seleccionados los puntos no validos o no presentes a aproximar, es necesario determinar para cada uno de ellos los valores de los puntos circundantes que lo rodean y comprobar si se pueden emplear para la obtencion del nuevo punto. Se tomaran todos aquellos puntos que

se encuentran a una distancia igual o inferior a d_p veces la distancia uniforme de separacion entre puntos, lo que supone un total de puntos $n_p = 2d_p - 1$. De modo general, se tomara $d_p = 2$, aunque puede emplearse una distancia aun mayor, a fin de abarcar mas puntos, si la precision requerida obliga a ello.

La obtencion de los mismos es sencilla, ya que para obtener los puntos vecinos del punto $P_i = (x_i, y_i, z_i)$, basta tomar todos los puntos cuyas coordenadas en el plano XY se encuentren contenidas en el rectangulo construido en dicho plano a partir de los vertices (x_{i-d_p}, y_{i-d_p}) y (x_{i+d_p}, y_{i+d_p})

Dado que existen varias razones que pueden condicionar el uso de parte de los puntos descritos, seria necesario establecer un umbral minimo que permita considerar que el numero de puntos a emplear son suficientes para asegurar que el valor del punto desconocido que se obtendra va a corresponderse con la superficie con un grado de precision dentro de los limites aceptables. Este valor umbral varia segun la geometria y el nivel de precision requerido por el tratamiento laser que vaya a llevarse a cabo, por lo cual no se ha podido establecer dicho valor de modo general. Para los experimentos realizados se ha considerado que para generar un valor con ciertas garantias, debe poder emplearse un minimo del 75 % de los puntos distribuidos de modo homogeneo asi obtenidos, aunque se han observado casos en los que bastaba el 15 % de ellos.

Las razones mas habituales para que no se puedan emplear algunos de los puntos vecinos son las siguientes:

- El punto vecino en cuestion es tambien un punto desconocido, ya sea de tipo no valido o de tipo no presente. En algunos casos, es posible que todos, o la mayoria de vecinos entren dentro de esta categoria, debiendose o bien a que el punto a determinar se encuentra en un hueco legitimo en la geometria o bien a una zona de sombra.
- Los vecinos estan claramente distribuidos en dos o mas grupos con alturas diferentes, pudiendo obtenerse dos o mas planos de ajuste con un error minimo para ambos, o bien un unico plano de ajuste con un error muy superior. Este caso es tipico cuando el area del rectangulo que contiene los puntos contiguos corta una esquina o escalon de la geometria. Es conveniente en esta situacion, tomar unicamente los puntos que correspondan a la altura que tenga mayor presencia en la zona mas cercana al punto, puesto que permitiran un mejor ajuste, aun reduciendo el numero de los mismos.

5.5.2. Generacion de plano auxiliar

Se calculara el plano que contiene los puntos vecinos de los buscados, que se habran obtenido en el paso anterior, a fin de emplearlo como resultado intermedio para la obtencion de los nuevos valores estimados. Considerando que, de modo general, no todos los puntos estaran contenidos en un mismo plano, es necesario aproximar uno mediante algun tipo de criterio, siendo en este caso el metodo de minimos cuadrados, que se detalla a continuacion:

Sea un conjunto de puntos $P_i = (x_i, y_i, z_i)$ tales que $i = 1, 2, \dots, n$, pudiendose describir la ecuacion de un plano que contenga a cualquiera de los puntos descritos como $z = ax + by + c$. Dado que puede no existir un plano que los contenga a todos, se determinara el plano que esta mas proximo a contenerlos a partir del conjunto de ecuaciones $d_i = ax_i + by_i + c - z_i$, buscando los parametros a , b y c que permiten obtener el valor $\varepsilon_{min}^2 = \min(\sum_{i=1}^n d_i^2)$.

Para cumplir el criterio de distancia, o error, minimo se buscara los valores donde la primera derivada se anula, resolviendo el sistema de ecuaciones que se obtiene de aplicar esta condicion.

Partiendo de la ecuacion que permite minimizar el error del plano

$$f(a, b, c) = \sum_{i=1}^n (ax_i + by_i + c - z_i)^2$$

se calculan las derivadas primeras y se igualan a cero para hallar el minimo

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial a} &= \sum_{i=1}^n 2(ax_i + by_i + c - z_i)x_i = 0, \sum_{i=1}^n ax_i^2 + \sum_{i=1}^n bx_iy_i + \sum_{i=1}^n cx_i = \sum_{i=1}^n x_iz_i \\ \frac{\partial f}{\partial b} &= \sum_{i=1}^n 2(ax_i + by_i + c - z_i)y_i = 0, \sum_{i=1}^n ax_iy_i + \sum_{i=1}^n by_i^2 + \sum_{i=1}^n cy_i = \sum_{i=1}^n y_iz_i \\ \frac{\partial f}{\partial c} &= \sum_{i=1}^n 2(ax_i + by_i + c - z_i) = 0, \sum_{i=1}^n ax_i + \sum_{i=1}^n by_i + \sum_{i=1}^n c = \sum_{i=1}^n z_i \end{aligned}$$

que representado en forma matricial quedaria como

$$\begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_iy_i & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_iy_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n y_i & \sum_{i=1}^n 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n x_iz_i \\ \sum_{i=1}^n y_iz_i \\ \sum_{i=1}^n z_i \end{pmatrix}$$

una vez resuelto el sistema y obtenidos los valores de los parametros a , b y c queda definido el plano de ajuste

5.5.3. Calculo de paraboloide de ajuste y aproximacion de puntos

Una vez realizado el paso previo, se efectuara una transformacion de sistema de coordenadas, colocando el nuevo origen de coordenadas en el plano de ajuste. Dicha transformacion, mediante la aplicacion de una matriz de paso $R_{00'}$, se aplicara tanto a los puntos vecinos del punto no valido o no presente, $P_N = (x_N, y_N, z_N)$ en el sistema de referencia absoluto, obteniendose un conjunto de puntos $P'_i = (x'_i, y'_i, z'_i)$ tales que $i = 1, 2, \dots, n$ como al propio valor del punto, obteniendose $P'_N = (x'_N, y'_N, z'_N)$.

Una vez efectuada la transformacion, cabe la posibilidad de que se pueda efectuar la aproximacion del punto de modo directo, mediante la ecuacion del propio plano, si se observa que una vez realizado el ajuste por minimos cuadrados, el error total acumulado es muy pequeño. En caso contrario, se procedera a ajustar el conjunto de puntos descritos en el nuevo plano mediante un paraboloide para determinar el nuevo valor de z'_n , que representara la altura del punto a ajustar en el nuevo sistema de coordenadas. Al igual que en el caso del plano auxiliar, en general dichos puntos no estaran contenidos en un paraboloide, por lo que se hace necesario efectuar un nuevo ajuste por minimos cuadrados, que se detalla a continuacion:

Partiendo de la ecuacion que permite minimizar el error del paraboloide

$$f(a, b) = \sum_{i=1}^n (ax_i'^2 + by_i'^2 - z'_i)^2$$

se calculan las derivadas primeras y se igualan a cero para hallar el minimo

$$\begin{aligned} \frac{\partial f}{\partial a} &= \sum_{i=1}^n 2(ax_i'^2 + by_i'^2 - z'_i)x_i'^2 = 0, \sum_{i=1}^n ax_i'^4 + \sum_{i=1}^n bx_i'^2y_i'^2 = \sum_{i=1}^n x_i'^2z'_i \\ \frac{\partial f}{\partial b} &= \sum_{i=1}^n 2(ax_i'^2 + by_i'^2 - z'_i)y_i'^2 = 0, \sum_{i=1}^n ax_i'^2y_i'^2 + \sum_{i=1}^n bx_i'^4 = \sum_{i=1}^n y_i'^2z'_i \end{aligned}$$

que representado en forma matricial quedaria como

$$\begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n x_i'^4 & \sum_{i=1}^n x_i'^2 y_i'^2 \\ \sum_{i=1}^n x_i'^2 y_i'^2 & \sum_{i=1}^n y_i'^4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n x_i'^2 z_i' \\ \sum_{i=1}^n y_i'^2 z_i' \end{pmatrix}$$

una vez resuelto el sistema y obtenidos los valores de los parametros a y b queda definido el paraboloide de ajuste como

$$ax'^2 + by'^2 - z' = 0$$

pudiendose despejar el valor en el eje Z' del punto a calcular como

$$z'_N = ax_N'^2 + by_N'^2$$

y basta deshacer la transformacion para obtener el punto buscado P_N

$$R_{00'}^{-1} \begin{pmatrix} x'_N \\ y'_N \\ z'_N \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_N \\ y_N \\ z_N \\ 1 \end{pmatrix}$$

El procedimiento aqui descrito se puede generalizar a cualquier otro paraboloide con ecuacion tal que permita un tratamiento equivalente.

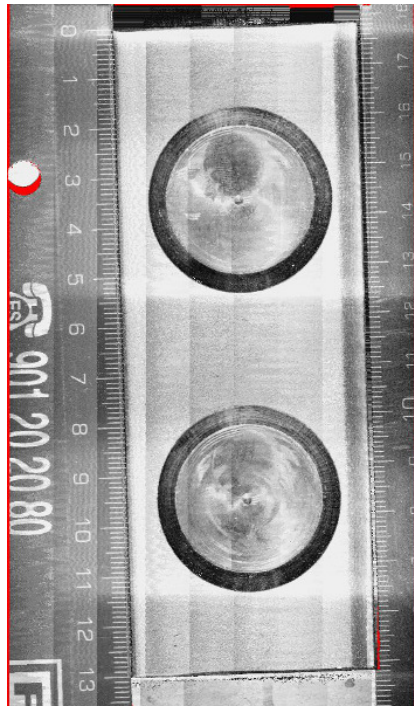


Figura 5.6: Ejemplo de union de capas completa, una vez eliminados los puntos no validos o no presentes

5.6. Metodologia de resolucion del problema de sombras

Para evitar la aparicion de sombras que se producen cuando existen superficies con angulos superiores al formado por la camara y la linea laser, es posible modificar la posicion de la

pieza en el sistema y muestrear con un plano de referencia distinto. Para cubrir la mayor parte de eventualidades que puedan surgir, es necesario poder inclinar o bien la pieza, o bien la herramienta de medida, empleando giros como los descritos segun los angulos de Euler ψ , de precesión, y θ , de nutación, esto es, son necesarios al menos dos grados de libertad.

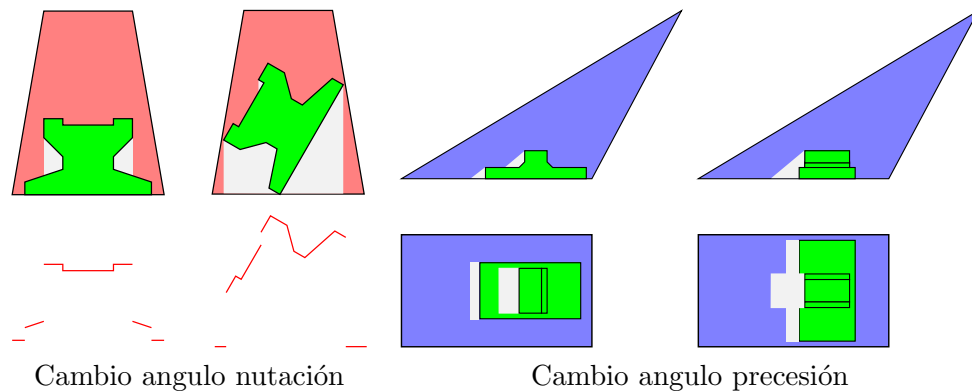


Figura 5.7: Ejemplo de casos de sombras. En el diagrama de la izquierda se muestra un conjunto de sombras originado por un entrante de la pieza que no llega a ser iluminado por el laser, siendo la solución en este caso inclinar la geometría o la herramienta, sumando o restando, segun el caso, unos 45 grados al ángulo de nutación. En el diagrama de la derecha se muestra un conjunto de sombras originado por un punto ciego de la cámara debido a la orientación, en el sentido de desplazamiento, de la herramienta de medida, siendo la solución en estas circunstancias modificar la orientación del escaner o rotar la pieza, sumando o restando, segun el caso, unos 90 grados al ángulo de precesión

Como se ha comentado previamente, una vez efectuada la rotación y la medida, basta calcular la matriz de transformación que permitiera convertir los perfiles obtenidos en el nuevo sistema de referencia al original. Se ha propuesto un nuevo proceso de combinación de los nuevos datos con los tomados anteriormente, compatible y/o complementario con los ya indicados a lo largo del capítulo, que se realizara del modo siguiente:

- Se tomaran solo aquellos puntos del conjunto de nuevos perfiles que se encuentren en la vecindad de los puntos de los datos originales, dejando de lado aquellos que estan contenidos en los huecos. Se han propuesto varios metodos para realizar la seleccion de dichos puntos, aunque el funcionamiento de cada uno de ellos esta condicionado por la geometria de la superficie original:
 - Calcular la distancia de los nuevos puntos a la superficie original, tomando unicamente aquellos que se encuentren a una distancia minima.
 - Generar un poligono a partir de los bordes conocidos de un hueco en la superficie original, eliminando los nuevos puntos que esten contenidos en dicho poligono, una vez efectuada una proyeccion del mismo y de los nuevos puntos sobre el plano que maximiza su area.
- Se generara una nueva superficie a partir de los puntos seleccionados en el paso anterior y se ajustara su posicion de modo que coincida con la ROI equivalente en la superficie original, empleando un criterio de minimos cuadrados.
- El desplazamiento y giro de la superficie descrito en el paso anterior permitira la obtencion de una matriz de transformacion, que se aplicara al conjunto de puntos nuevos puntos no empleados para generar la superficie de ajuste, añadiendolos posteriormente de modo directo a la nube de puntos original.

Aunque se han realizado algunas pruebas preliminares, todavía se está trabajando en una solución general que permita a este módulo tener la capacidad de realizar la búsqueda automática de zonas cubiertas por sombras y escaneo automático de las mismas, empleando la orientación preferente para maximizar la obtención de nuevos puntos en esas zonas, así como la combinación automática de muestreos de la misma superficie con distintos ángulos de rotación.

Capítulo 6

Metodos para procesamiento laser usando modelos de superficies y volúmenes

En este capítulo se describen los métodos que se han empleado para resolver los dos problemas siguientes:

1. Generar trayectorias sobre una superficie empleando como base directamente la nube de puntos que la aproxima.
2. Generar trayectorias que puedan recorrer un conjunto de capas tales que permitan la adición o arranque de material empleando como base un conjunto de volúmenes obtenidos a partir de una nube de puntos y/o procedentes de un modelo tridimensional.

A pesar de que se trata de problemas diferentes, en ambos casos se empleará como información básica una nube de puntos, puesto que es necesario utilizar información de la superficie de la pieza en su estado actual. Adicionalmente, se ha planteado un algoritmo común de relleno de áreas para ambos casos.

Aunque existen algunas aproximaciones (ver [9], [27]) que permiten resolver este conjunto de problemas, se han buscado alternativas que tienen como objetivo minimizar el tiempo de cálculo de las trayectorias manteniendo un grado razonable de precisión.

6.1. Generación de trayectorias sobre una superficie

En este apartado se describirá un método que permite trazar el camino que debe describir la herramienta directamente sobre la superficie y la generación automática de la trayectoria a partir de dicha traza. Esto permite reducir la dificultad a la hora de definir los movimientos de la herramienta sobre la pieza y, a su vez, permite mantener una distancia constante a la superficie, así como orientar la herramienta según la normal de la misma superficie en cada instante, sin necesidad de cálculos o conocimiento de la geometría de la pieza por parte del usuario.

Aunque es a priori factible realizar trayectorias de todo tipo, solo se han implementado por el momento trazas cuya proyección en el plano XY sea una línea recta. Para otro tipo de trazados, aunque el resultado sea menos óptimo que empleando el algoritmo que se describirá a continuación, es posible utilizar el procedimiento descrito en 3.2.4 para recorrer una secuencia de puntos 3D libres.

Como se ha indicado, existen varios métodos que permitan utilizar la nube de puntos para obtener la secuencia de puntos de la superficie que permitiera describir la trayectoria, así como diferentes métodos para simplificar dicha secuencia, pero normalmente requieren una conversión de la nube de puntos a una superficie que se pueda describir matemáticamente,

como una NURBS, o bien el uso de procesos de aproximacion similares a los empleados en 5.5 para obtener las coordenadas de los puntos cruzados por la traza pero no presentes en la nube de puntos original, siendo la mayoria de alto coste computacional. En este caso se ha optado por una aproximacion mas sencilla, utilizando directamente la nube de puntos y el algoritmo de Bresenham para seleccionar aquellos puntos de la misma que daran lugar a la secuencia de puntos de la trayectoria del modo descrito mas adelante. Esta aproximacion se considerara valida en tanto en cuanto se cumpla que la distancia entre los puntos de la nube sea inferior a la precision requerida por el tratamiento laser que se pretenda realizar.

La aplicacion desarrollada permite visualizar la superficie escaneada, mediante los valores de reflectividad obtenidos de la misma, y directamente sobre ella, seleccionar el punto inicial y final de la traza.

6.1.1. Algoritmo de Bresenham

El algoritmo original de Bresenham (ver [8]) permite trazar una linea en una rejilla uniforme de puntos, originalmente pixels, usando unicamente suma y resta de enteros, por lo que permite aproximar una linea trazada sobre la proyeccion en el plano XY de una superficie descrita mediante una nube de puntos como la obtenida despues de aplicar los criterios descritos en 5.3. Este metodo tiene, ademas, la ventaja adicional de no requerir el uso de los valores propios puntos de la nube de puntos para efectuar el calculo de cuales se consideraran pertenecientes a la linea, puesto que el algoritmo emplea directamente las posiciones, en lugar de las coordenadas.

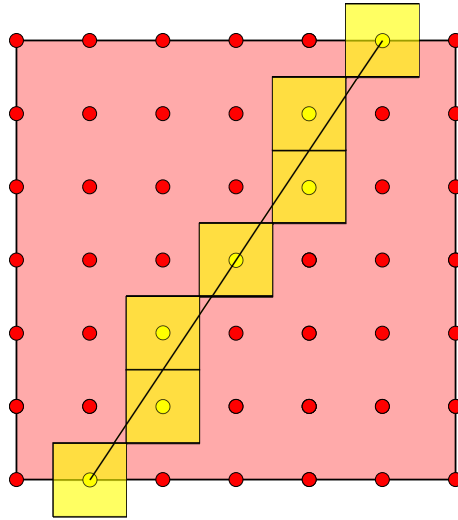


Figura 6.1: Ejemplo de seleccion de elementos en nube de puntos. Se muestran en amarillo los puntos seleccionados, asi como la equivalencia con el pixel correspondiente

En este trabajo se empleara una version del algoritmo original descrito por Bresenham, que solo es apto para lineas. Para utilizar otro tipo de elemento geometrico, es necesario emplear alguno de los algoritmos generalizados, que permiten extenderlo a todas aquellas tipologias de curvas que puedan describirse con una funcion de tipo $f(x, y) = 0$.

A continuacion se detalla el proceso de seleccion de puntos a partir de la posicion inicial (x_0, y_0) y final (x_1, y_1) de la recta (debe recordarse que se trata de posiciones de los puntos en la malla, no de los valores de coordenadas de los mismos):

1. Se definen $dx = |x_1 - x_0|$, $sx = \frac{x_1 - x_0}{|x_1 - x_0|}$, $dy = -|y_1 - y_0|$, $sy = \frac{y_1 - y_0}{|y_1 - y_0|}$ y $e = dx + dy$ y se pasa al paso siguiente.

2. Se toma el punto inicial de la linea como valor del punto actual $P_a = (x_a, y_a) = (x_0, y_0)$ y se pasa al paso siguiente.
3. Se añade el punto actual P_a a la secuencia ordenada de puntos que definen la linea y se pasa al paso siguiente.
4. Si $2e \geq dy$ se pasa al paso siguiente, en otro caso, se avanza hasta el paso seis.
5. Si se cumple que el valor de x_a es igual a x_1 el proceso termina, en otro caso, se tendra que el nuevo valor de e sera igual a la suma del antiguo valor de e y la constante dy (o dicho de otro modo $e = e + dy$) y el nuevo valor de x_a del punto actual sera igual a la suma del antiguo valor de x_a y la constante sx (o dicho de otro modo $x_a = x_a + sx$) y se pasa al paso siguiente.
6. Si $2e \leq dx$ se pasa al paso siguiente, en otro caso, se vuelve al paso tres.
7. Si se cumple que el valor de y_a es igual a y_1 el proceso termina, en otro caso, se tendra que el nuevo valor de e sera igual a la suma del antiguo valor de e y la constante dx (o dicho de otro modo $e = e + dx$) y el nuevo valor de y_a del punto actual sera igual a la suma del antiguo valor de y_a y la constante sy (o dicho de otro modo $y_a = y_a + sy$) y se vuelve al paso tres.

Una vez obtenida la secuencia ordenada de puntos de la nube que describen la traza, se puede construir una sucesion de segmentos que uniran dichos puntos, cada uno de los cuales permite definir un elemento linea 3D como se describe en 3.2.1. Esta secuencia de elementos da origen de modo inmediato a una primera trayectoria compuesta, de modo general, por una gran cantidad de elementos. Dicha trayectoria, en muchos casos, puede ser simplificada a fin de obtener una que se ajusta de modo aproximado a la primera sin que suponga perdidas importantes de precision, pero compuesta por menos elementos y siendo, por lo tanto, mas sencilla. Si fuese necesario un grado de precision mayor, debido por ejemplo a una superficie irregular, podria hacerse una aproximacion de puntos mas cercanos a la traza uniendo los obtenidos mediante el algoritmo de Bresenham con el punto vecino que se encuentre al otro lado del plano descrito por la traza, encontrando el nuevo punto en la posicion de corte del segmento que une los puntos con dicho plano.

En caso de que sea necesario colocar la herramienta en una posicion perpendicular a la superficie en cada punto, seria necesario calcular las normales de cada uno de los indicados en la secuencia, utilizandola para determinar la orientacion de la herramienta para el punto final del elemento linea 3D que llega al punto, si existiese, y para el punto inicial de la linea 3D que parte del punto. Para efectuar el calculo indicado y determinar el valor de la normal en un punto P_N existen varias alternativas:

1. Como se indica en 5.5.2 y 5.5.3, se puede calcular el valor del plano auxiliar de ajuste de los puntos vecinos de P_N , luego obtener la ecuacion del paraboloide en el plano auxiliar y, una vez obtenida, a traves de las derivadas de la misma, se podrian obtener las tangentes de la curva en las dos direcciones para la posicion P_N . A partir de dichas tangentes, transformadas al sistema de referencia absoluto, es posible obtener las normales en las dos direcciones, y mediante una composicion de vectores se podria, finalmente, obtener el valor de la normal buscado
2. Se pueden aproximar tanto las filas como las columnas de la nube de puntos mediante curvas derivables. Una vez obtenidas las curvas de la fila y columna que contienen el punto P_N , se puede usar la ecuacion que las define para obtener las tangentes en dicho punto y proceder del modo indicado en la parte final de la alternativa anterior

3. Se puede aproximar la nube de puntos completa mediante un sistema de ecuaciones que defina la superficie. Con dichas ecuaciones, mediante derivacion, es posible obtener el valor de la normal en dicho punto. Este metodo, sin embargo, obligaria a realizar una operacion que se pretendia evitar y puede ser necesario el uso de metodos numericos para la resolucion

6.1.2. Simplificacion de puntos de la traza

En relacion al criterio empleado para simplificar puntos de la traza, dado que se ha particularizado el caso para una linea, es posible considerar que todos los puntos se encuentran situados en el mismo plano, siendo este el definido por el vector unitario \hat{k} perpendicular al plano XY y por el vector $\mathbf{P}_1\mathbf{P}_0$ construido a partir del punto de inicio P_0 y del punto final P_1 de la traza. Partiendo de este supuesto, se puede reducir el problema tridimensional a unicamente dos dimensiones, lo cual facilita su visualizacion.

Por tanto, despues de aplicar esta consideracion, se partira de un conjunto de n puntos $P'_i = (k_i, z_i)$ ordenados. Para comprobar si es posible eliminar un punto o conjunto de puntos se seguiran los siguientes pasos:

1. Se parte del primer punto del listado y se considera dicho punto como inicial de un nuevo segmento y se pasa al paso siguiente
2. Se toma el punto del listado que sigue en orden al inicial y se considera dicho punto como final del nuevo segmento y se pasa al paso siguiente
3. Se procede a trazar una recta que una el punto inicial con el punto final y se pasa al paso siguiente.
4. Si se cumple la condicion de que no hay puntos entre el punto inicial y el final, o bien que todos los puntos del listado entre el inicial y el final se encuentran a una distancia de la recta inferior a un valor umbral $\Delta\epsilon$, se toma el punto del listado que sigue en orden al final y se considera dicho punto como nuevo final, volviendo al paso 3. Si deja de cumplirse la condicion o no quedan mas puntos en el listado que sigan al final, se pasa al paso siguiente.
5. Se toma el segmento constituido por el punto inicial y el ultimo punto en que se cumpla la condicion (de modo general el punto que precede al actual punto final, salvo en el caso del ultimo punto del listado), se añade al listado de segmentos simplificados y se pasa al paso siguiente.
6. Si el ultimo punto del segmento se corresponde con el ultimo punto del listado el proceso termina, en caso contrario, este ultimo punto del segmento pasa a ser el punto inicial y se vuelve al paso dos.

Si fuera necesario efectuar una trayectoria en que se utilizan los valores de las normales de la superficie para definir la inclinacion de la herramienta, el listado de puntos deben llevar asociado un listado con las normales correspondientes a cada punto. El procedimiento seria equivalente al previamente descrito, pero tendria que cumplirse una condicion adicional de que el angulo formado por la normal del punto inicial y la normal del punto final debe ser inferior a un valor umbral $\Delta\delta$ y con la salvedad de que, en caso de no cumplirse, se procederia a cerrar el segmento simplificado con el valor final (en lugar del punto precedente). El resto del procedimiento continuaria del modo indicado previamente a partir de ese punto.

Tanto el valor umbral de $\Delta\epsilon$ como de $\Delta\delta$ son dependientes del tratamiento que se desee realizar, por lo que no es posible dar un valor orientativo de los mismos sin estudiar previamente el nivel de precision que se pretende alcanzar y el proporcionado por el sistema de medicion.

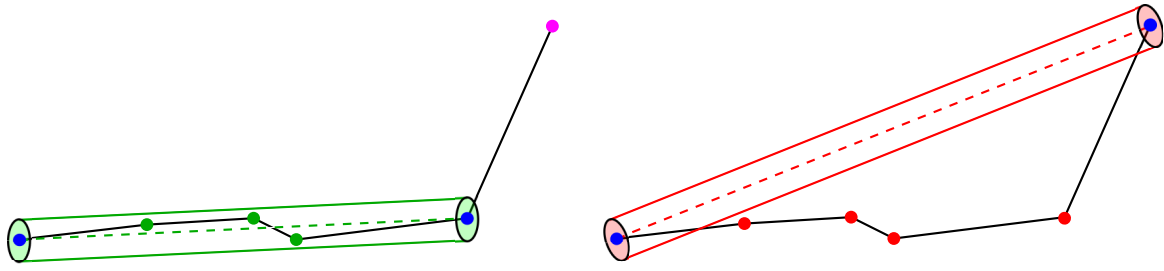


Figura 6.2: Ejemplo de simplificación de elementos traza, en la figura de la izquierda se observa que el grupo de puntos P'_1 , P'_2 y P'_3 (en verde) que genera los segmentos de la traza entre los puntos inicial P'_0 y final P'_4 (en azul) están contenidos en el interior de un cilindro de radio $r = \Delta\epsilon$ y eje axial definido por $\mathbf{P}'_4\vec{\mathbf{P}}'_0$, por lo que es posible su simplificación; en la figura de la derecha se observa sin embargo que, después de una iteración más, el grupo de puntos P'_1 , P'_2 , P'_3 y P'_4 (en rojo) no está contenido, lo cual marca el final del tramo simplificado en el punto anterior al final actual

6.1.3. Generación de múltiples trayectorias mediante selección de áreas

En muchos casos, en lugar de efectuar un único desplazamiento entre dos puntos, resulta necesario efectuar múltiples traslaciones a lo largo de un área, por ejemplo para efectuar un recubrimiento sobre una zona a reparar de una pieza. Resulta interesante en este caso poder realizar el proceso de manera análoga al descrito para única traza lineal, definiendo los vértices del polígono que rodea el área a rellenar, en lugar de definir los puntos inicial y final de la recta.

Una vez obtenido dicho polígono, basta aplicar los criterios explicados en 6.2.3¹ para efectuar el relleno del mismo, utilizando el método más adecuado para cada caso. A continuación, el conjunto de líneas de relleno y las propias aristas del polígono, se tratarán como un grupo de trazas que pueden ser convertidas en trayectorias del modo indicado en 6.1, completando así el proceso.

Dado que los puntos inicial y final de las líneas de relleno pueden no coincidir con puntos de la nube, ya que no se seleccionan directamente sobre ella, se aproximarán al más cercano. Si estos puntos que definen las rectas estuviesen contenidos en las aristas del polígono, el criterio será el buscar el punto de la nube más cercano de los que estén contenido en el conjunto de puntos, obtenidos a través del uso del algoritmo de Bresenham, tales que describen la arista.

Al igual que en el caso previo, la aplicación desarrollada permite visualizar la superficie escaneada, mediante los valores de reflectividad obtenidos de la misma, y directamente sobre ella, seleccionar los vértices que permiten obtener el polígono que rodea el área, así como los parámetros de relleno a utilizar.

6.2. Generación de trayectorias a partir de volúmenes

En este apartado se describirá un método que permite utilizar un elemento malla como referencia para obtener una serie de trayectorias que puedan ser descritas empleando una herramienta láser, a fin de realizar un proceso de adición de material (como en el caso del cladding), o bien de arranque de material (como en el caso del micromecanizado). En este contexto, una malla representará un volumen compuesto por una serie de elementos individuales discretos,

¹La parte referenciada del texto se ha incluido en la sección indicada y no antes porque se ha considerado que describirla fuera del contexto adecuado dificultaría su comprensión

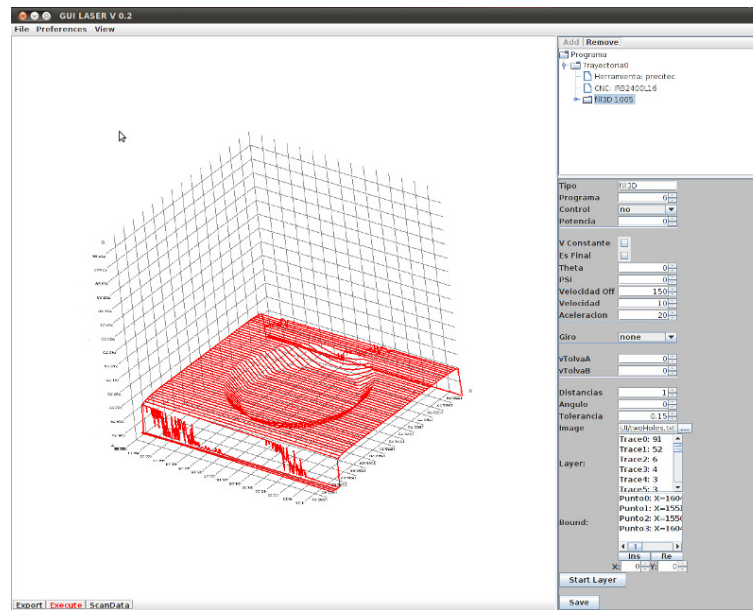


Figura 6.3: Ejemplo de un relleno de area obtenida aplicando la metodologia descrita a lo largo de este capitulo. En ella se muestran las trazas que se realizaran sobre la superficie

en el caso descrito, un conjunto de triangulos almacenados en un formato ampliamente extendido conocido como STL (ver A.7). Los pasos necesarios para llevar a cabo el proceso son los siguientes:

- Si se parte de una nube de puntos, una vez simplificada, se generara un archivo STL empleando el metodo de Voronoi/Delaunay para llevar a cabo la triangularización
- Se tomará un archivo en formato STL con la geometría a construir o eliminar
- Se procesará el archivo modificando su posición y tamaño para cada caso
- Se generarán las distintas áreas obtenidas a partir de seccionar la geometría con los planos de corte perpendiculares a un eje a distintas alturas
- Se rellenaran dichas áreas con una combinación de trayectorias de movimiento y disparo definida por el usuario
- Se convertirán a ordenes que pueda entender el equipo correspondiente tales trayectorias y se almacenaran en un fichero
- Se le enviarán al sistema de posicionamiento los comandos previamente almacenados que permitan llevar a cabo todo el proceso

Ademas de procesar los volúmenes individuales, esto es, todos aquellos que no se intersectan con ningun otro volumen definido en el mismo espacio, es posible combinarlos mediante diferentes operaciones booleanas, a fin de aplicar la metodologia descrita a varios procesos productivos. A continuacion se describen los mas directos de modo breve, sin incidir en la parte de mecanizado o fabricacion, a fin de indicar la utilidad practica de la tecnica descrita:

- Fabricacion directa y/o mecanizado de volúmenes individuales: Basta calcular los cortes del volumen y realizar las trayectorias obtenidas, sin necesidad de procesos adicionales. Un caso particular de este proceso pasa por la obtencion de la malla de triangulos a partir de una nube de puntos, lo que permitiria duplicar elementos ya existentes, o bien modificados de los mismos, simplemente editando el volumen obtenido originalmente.

- Modificación y/o reparación de pieza ya existente: Se puede partir de una representación tridimensional ideal que refleje la pieza original u objetivo y compararla con el volumen obtenido, mediante el uso del escaner laser, a partir de la pieza real a tratar. Dicha comparación implica aplicar un criterio de unión y/o diferencia entre diferentes volúmenes, a fin de obtener un nuevo volumen o conjunto de volúmenes individuales que represente únicamente las partes de la pieza que se desean añadir/rellenar o eliminar. Una vez obtenidas las nuevas geometrías, al igual que en el caso anterior, basta calcular los cortes del volumen y realizar las trayectorias obtenidas.

6.2.1. Triangularización de Delaunay

Como se ha indicado en 5, es posible la obtención y tratamiento de una nube de puntos utilizando un escaner laser, siendo esta un fiel reflejo de la geometría de la superficie de trabajo de modo previo a su tratamiento.

Una vez tratada aplicando los criterios previamente descritos de filtrado e interpolación de puntos no válidos, es posible seleccionar en la misma una o varias ROI que será necesario convertir en volúmenes formados por triángulos, lo cual permitirá su almacenamiento en formato STL.

Para realizar la conversión indicada, dado que se parte de una nube de puntos que contiene un número discreto de coordenadas pertenecientes a una superficie, es necesario aplicar un algoritmo de generación de triángulos para obtener una aproximación de dicha superficie y añadir una serie de superficies auxiliares que permitan efectuar el cierre del volumen.

Asumiendo que no existiesen puntos no válidos, y teniendo en cuenta que en origen la nube de puntos en origen es una matriz regular de puntos, la triangularización directa sería trivial, tomando puntos de dos filas consecutivas dos a dos y generando una pareja de triángulos, pero esto implicaría, en la mayor parte de las superficies, una elevada redundancia informativa no necesaria y haría más lento el uso posterior de la malla. Por lo tanto, en general, es necesario aplicar un criterio de simplificación del primer resultado de triangularización directa que, en primera aproximación, se basa en la eliminación de vértices compartidos por grupos de triángulos que tengan una normal de igual módulo y sentido, teniendo en cuenta que una vez eliminado dicho vértice todavía es posible construir, con los vértices restantes, un conjunto que contenga un número inferior de nuevos triángulos.

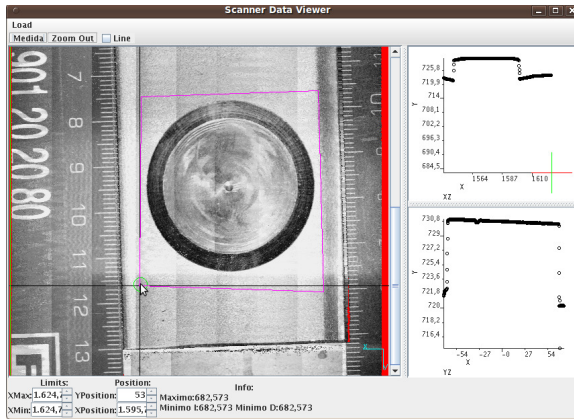
En estas circunstancias, después de aplicar dicho criterio, se ha optado por crear una malla de triángulos a partir de algoritmos que obliguen a que dicha malla cumpla la condición de Delaunay (ver [11]), esto es, que la circunferencia, o esfera, si se trata del problema tridimensional, circunscrita de cada triángulo de la malla no contendrá ningún vértice de otro triángulo. Emplear dicho criterio permite obtener una geometría con los ángulos más pequeños de los distintos triángulos maximizados, y de este modo se reducen, en la medida de lo posible, los errores de cálculo que se pudieran dar si hubiese gran presencia de triángulos muy agudos a la hora de efectuar los cortes. Existen además métodos complementarios (ver [37]) que permiten aumentar el nivel de simplificación en algunos casos, aunque por los tratamientos posteriores que se han planteado, no se han aplicado en este trabajo.

Aunque es posible utilizar algunos de los algoritmos de cálculo de la triangularización de Delaunay en 3D, dependiendo de la relación entre las distintas coordenadas de los puntos de la nube y si es necesario minimizar el tiempo de procesamiento, a veces basta calcular los triángulos en 2D empleando la proyección de los puntos de la nube en el plano cuyo vector normal es paralelo al eje del escaner laser en que se mide la altura de la superficie.

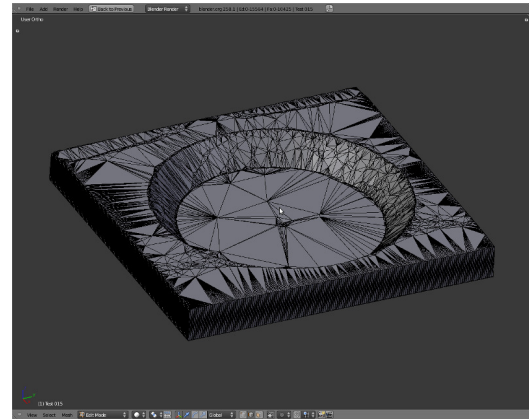
En el caso descrito, se ha empleado una librería FOSS ² para calcular la triangularización y se ha analizado la posibilidad de implementar otros algoritmos que permiten obtener un resultado

²<http://voronoi.stage.tigris.org/>

equivalente pero con una velocidad de calculo mayor, aunque no se ha llegado a optimizar este paso porque supera el alcance de este trabajo (ver [10]).



Selección de ROI



Conversion a STL

Figura 6.4: Ejemplo de selección de parte de una nube de puntos que representa la superficie de una pieza real, obtenida mediante escaneo laser, y aplicación de criterio de Delaunay para realizar la triangularización de la región seleccionada, procediendo finalmente a su conversión a formato STL

6.2.2. Corte de superficies 3D en STL y generación de áreas

Una vez leído el fichero STL, se realizarán las siguientes operaciones con los triángulos que lo forman al proceso de generación de áreas:

Traslación y giro

Esto permitirá ubicar la forma correctamente en el espacio de trabajo. Basta aplicar la matriz con los ángulos de Euler que corresponden a la posición deseada a todos y cada uno de los triángulos que la componen para girar y desplazar espacialmente la geometría. También será de aplicación esta matriz para efectuar cortes mediante planos que no sean perpendiculares al eje Z, para ello bastaría aplicarla de modo que el triedro intrínseco tenga el eje Z perpendicular al plano de corte deseado, realizar los cortes, y aplicar la matriz inversa tanto a la geometría como a los puntos de cada una de las áreas generadas.

Escalado

Esto permitirá construir la forma con el tamaño adecuado en cada caso. Basta multiplicar cada una de las coordenadas de los tres puntos del triángulo por el factor de escala correspondiente.

Corte

Se realizarán los cortes de la geometría mediante planos perpendiculares al eje Z a las distintas alturas deseadas. Para ello se aplicará el siguiente algoritmo para cada uno de los planos:

- Se seleccionan los triángulos que son cortados por el plano actual, es decir, todos aquellos que tienen un vértice por encima, que corresponde con el de coordenada Z máxima, y otro por debajo de dicho plano, que corresponde con el de coordenada Z mínima

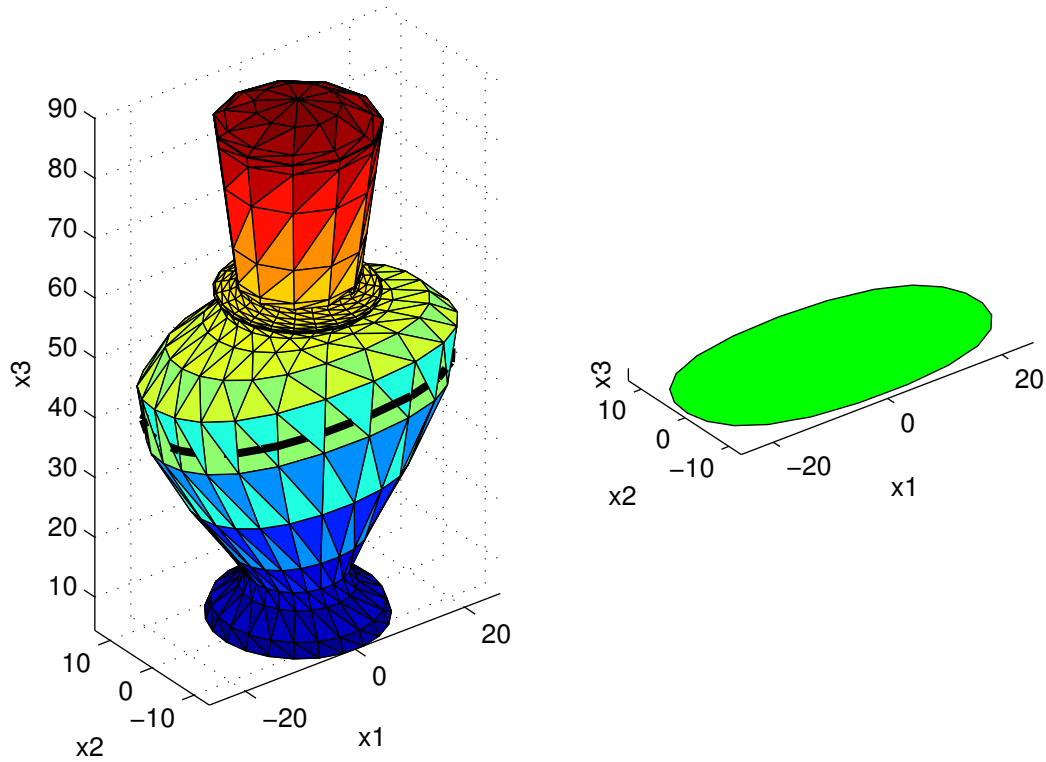


Figura 6.5: Ejemplo de un corte de representación de superficie tridimensional en formato STL

- Se determina la línea de intersección de cada triángulo seleccionado con el plano de corte ($z = z_p$). Se adoptara la convención de que $z_1 \leq z_2 \leq z_3$, estableciéndose también que en caso de que $z_1 = z_2 = z_3$, esto es, cuando el triángulo es paralelo al plano, no existe ningún corte.

Las ecuaciones de las aristas del triángulo vienen dadas por las ecuaciones siguientes, conocido que $\forall i, j = \{1, 2, 3\} / i \neq j$:

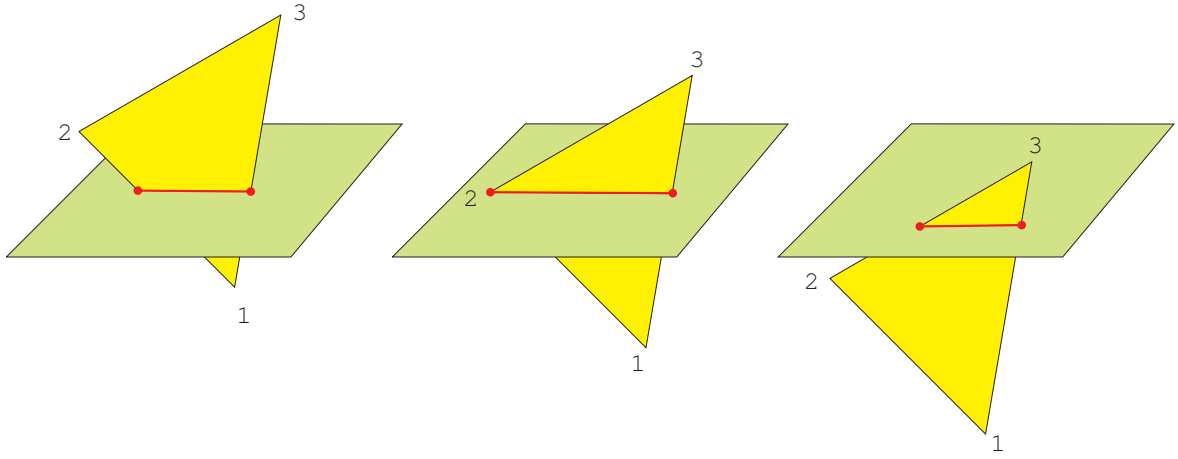
$$l_{i,j} = \begin{cases} x_{i,j} = x_i + \frac{x_j - x_i}{z_j - z_i} (z - z_i) \\ y_{i,j} = y_i + \frac{y_j - y_i}{z_j - z_i} (z - z_i) \end{cases}$$

Basta sustituir $z = z_p$ y aplicarlo a las líneas siguientes para buscar los dos puntos con tres coordenadas espaciales que se corresponden con los extremos de la línea de intersección:

Caso $z_p > z_2 \Rightarrow$ líneas $l_{1,3}$ y $l_{2,3}$

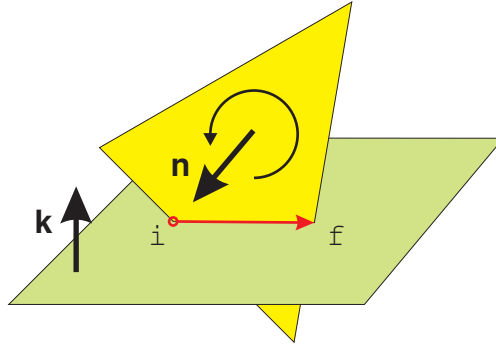
Caso $z_p < z_2 \Rightarrow$ líneas $l_{1,2}$ y $l_{1,3}$

Caso $z_p = z_2 \Rightarrow$ líneas $l_{1,3}$ y vértice 2



- Se comprobará que cada triángulo cumple la regla de la orientación del formato, y en caso de que exista discrepancia, prevalecerá el sentido de la normal calculado a partir de los vértices. Para ello basta calcular el producto vectorial de $\vec{r}_{1,2}$ y $\vec{r}_{2,3}$

$$\vec{n} = \frac{\vec{r}_{1,2} \times \vec{r}_{2,3}}{|\vec{r}_{1,2} \times \vec{r}_{2,3}|} \Rightarrow \begin{cases} \vec{n} > 0 \Rightarrow \text{Sentido antihorario (CCW)} \\ \vec{n} < 0 \Rightarrow \text{Sentido horario (CW)} \end{cases}$$



- Dado que ahora, tanto los dos puntos de la línea de intersección de los triángulos con el plano de corte como el vector normal al triángulo son conocidos, se calculará en que sentido deben recorrerse los puntos, esto es, cual corresponde al inicio de la línea y cual al final. Para ello se construirá el vector que une los extremos de la línea de intersección seleccionando uno de los puntos como inicial y otro como final, luego se calculará el signo del producto vectorial de dicho vector con la normal al plano, si resultase que el resultado fuese un vector perpendicular al plano de corte de valor positivo, los puntos estarían ordenados adecuadamente, sin embargo si fuese de valor negativo, el punto inicial y final estarían invertidos

$$a = \vec{k} (\vec{n} \times \vec{r}_{i,f}) \Rightarrow \begin{cases} a > 0 \Rightarrow \vec{r}_{int} = \vec{r}_{i,f} \\ a < 0 \Rightarrow \vec{r}_{int} = -\vec{r}_{i,f} \end{cases}$$

Siendo \vec{r}_{int} el vector que contiene la información de dirección y sentido de la línea de intersección

- Una vez establecido el sentido de recorrido de cada una de las líneas de intersección de todos los triángulos que secciona el plano de corte, aquellas que tengan puntos en común deben unirse para construir conjuntos. Tales conjuntos pueden formar polilíneas, esto es, una secuencia de líneas con puntos de inicio y fin perfectamente definidos, o bien

polígonos, esto es una secuencia de líneas que encierra un área. En este caso solo nos interesará almacenar las entidades del segundo tipo, ya que son las que corresponderán con una rodaja de la superficie 3D en el entorno del plano de corte y es posible rellenarlas, siendo además las únicas que debieran aparecer si el sólido está correctamente construido. Para realizar este proceso se comprobará iterativamente si el punto final de una línea coincide con el punto inicial de otra de modo unívoco hasta que todas las líneas forman parte de una entidad. Dado que los puntos vienen dados por un número aproximado, y la construcción de las geometrías STL algunas veces no es todo lo buena que debería, para comprobar si un punto es igual a otro, se establece que la distancia entre ambos no debe superar cierto valor que llamaremos tolerancia. Desgraciadamente, dicho valor no puede ser establecido universalmente, y deberá ser seleccionado por el usuario en cada caso. Una vez fijado el valor de la tolerancia, y de modo previo a construir las entidades, se procederá a eliminar las líneas de intersección de menor tamaño que la tolerancia, así como aquellas cuyos extremos sean coincidentes y sentidos opuestos.

Generación de áreas planas

Una vez construidos todos los polígonos, se definirán las áreas contenidas en cada uno de los distintos planos de corte. Para ello se tendrá en cuenta que pueden existir dos tipos de polígono:

- Sólidos o padres: Se definirán de esta manera todos aquellos polígonos cuya área sea positiva
- Agujeros o hijos: Se definirán de esta manera todos aquellos polígonos cuya área sea negativa

Dicha área puede calcularse para un polígono plano de un modo sencillo empleando la fórmula siguiente:

$$A = \frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^{n-1} (x_i y_{i+1} - y_{i+1} x_i) + (x_n y_1 - y_n x_1) \right)$$

Siendo (x_i, y_i) las coordenadas correspondientes al vértice i del polígono

Después de calcular todas las áreas se comprobará que no existan sólidos contenidos dentro de otros sólidos, agujeros dentro de otros agujeros o agujeros que no estén contenidos en un sólido, y si este fuese el caso, no se emplearán a la hora de generar las distintas áreas o familias. Es importante reseñar que existe el caso particular de un agujero contenido en un sólido, a su vez contenido en un agujero, estando también este último contenido en un sólido, donde si habría que mantener todos y cada uno de los polígonos para generar las áreas. El algoritmo para conseguir diferenciar los elementos a mantener y a eliminar dista mucho de ser trivial, y de presentar interés para el lector, puede ser consultado el código de la aplicación. Una vez realizada la selección, se formarán grupos compuestos por un único sólido y, dependiendo del caso, ninguno, uno o más agujeros en él contenidos. Para comprobar si un polígono está contenido en otro, y dado que serán necesariamente coplanarios, se aplicará el teorema de Gauss en dos dimensiones para cada punto del polígono que se supone interior al otro tomando como área de integración la del polígono que se supone exterior, o lo que es equivalente a nivel práctico, se determinará el valor del ángulo sólido en el plano que se observa desde cada uno de los vértices del polígono que se pretende determinar si es interior respecto de todos los vértices del que se postula como exterior, considerando que cada vértice estará contenido si y solo si el ángulo sólido en el plano visto desde el mismo es de valor aproximadamente 2π , definiéndose como interior un polígono con todos los vértices contenidos.

6.2.3. Relleno de areas

Una vez clasificados los polígonos en padre e hijos, el área delimitada por cada familia se recorrerá con pasadas sucesivas separadas unas de otras por una distancia fija. Se han desarrollado tres métodos para realizar este barrido, aunque el tercero guarda similitudes con el primero y no se procedera a su descripción detallada:

- Líneas paralelas. En este caso todas las líneas son paralelas a una dirección fija, que por simplicidad se tomará vertical. El método sirve para cualquier orientación sin más que aplicar dos rotaciones, una de sentido negativo al polígono y luego una de sentido positivo a las líneas obtenidas. Es el método más sencillo pero tiene el inconveniente de que todas las pasadas empiezan y terminan en el contorno del polígono por lo que el acabado será de peor calidad.
- Polígonos paralelos al contorno. Ahora las líneas se obtienen como paralelas a los lados que definen el contorno. El proceso se realiza de forma iterativa, partiendo de una serie de familia de polígonos y determinado el nuevo conjunto de polígonos que se obtiene trazando paralelas a los anteriores. Este proceso puede dar lugar a la aparición de familias diferentes por lo que al final de cada etapa será necesario reclasificar los polígonos. La ventaja de este método es que la primera pasada recorre de forma continua el borde lo que proporciona un mejor acabado exterior.
- Espirales concéntricas y/o circunferencias concéntricas. En este caso, se calculara la circunferencia que circunscribe los poligonos solidos exteriores, se rellenara con una espiral concéntrica formada por una sucesion de arcos o bien por un conjunto de circunferencias concéntricas, cada una de las cuales puede ser representada mediante dos arcos, separadas entre si el valor previamente establecido de distancia, como en el caso de las lineas. Una vez obtenida la secuencia de arcos, basta establecer los puntos de corte de los mismos con los poligonos, manteniendo unicamente los tramos cortados de arco que se encuentren dentro de los poligonos solidos. Como se ha comentado, este metodo es muy semejante al descrito para las lineas paralelas, compartiendo el mismo inconveniente respecto del punto de comienzo y fin de los desplazamientos en los contornos del poligono. La ventaja frente al metodo de las lineas paralelas que, en ciertos casos puede justificar su uso, es que no existe una direccionalidad tan acusada en la geometria resultante.

A continuación describiremos los pasos necesarios para realizar los dos primeros procesos que iremos ilustrando con ejemplos.

Relleno con líneas paralelas

El primer paso consiste en determinar el rango de valores de las coordenadas x e y que viene dados por los valores máximos y mínimos de los vértices de la familia de polígonos. En el caso de rectas verticales igualmente espaciadas, la coordenada x que corresponde la línea vertical n -sima es

$$x_s = x_{\min} + n d$$

siendo d la separación entre las líneas. Para cada valor de x_s se deberán determinar los valores de y que corresponden al inicio y al final de una línea. Estos valores son las intersecciones de los lados del polígono con la recta vertical, así para el lado $i \rightarrow f$,

$$y_s = \begin{cases} y_i + \frac{y_f - y_i}{x_f - x_i} (x_s - x_i) & \text{si } 0 \leq \frac{x_s - x_i}{x_f - x_i} \leq 1 \\ \emptyset & \text{en otro caso} \end{cases}$$

En la figura 6.6 se muestran tres casos sencillos de intersección con una recta vertical. La situación se complica cuando la recta vertical pasa por algún vértice o coincide un lado del polígono, véase figura 6.7. El método utilizado y que funciona en todas las situaciones consiste en considerar como puntos de intersección válidos todos los que corresponden a un lado vertical ($x_f = x_i$) e incluir los que vértices que coinciden con x_s cuando se cumple de $x_i < x_s \leq x_f$ ó $x_f < x_s \leq x_i$. Esto último hace que unos vértices den lugar a 0, 1 ó 2 intersecciones tal como se indica en la figura 6.8.

Finalmente, los valores de las coordenadas y correspondientes a las intersecciones se ordenan de menor a mayor y se fusionan los lados contiguos o aquellos que terminan antes del inicio del siguiente. El resultado para el ejemplo anterior puede verse en la figura 6.9.

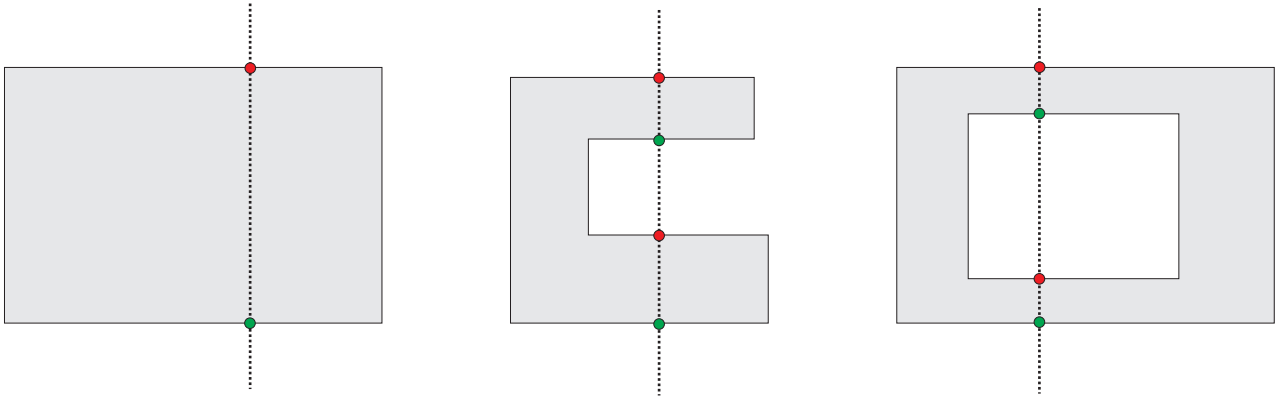


Figura 6.6: Intersección de tres polígonos sencillos con una recta vertical.

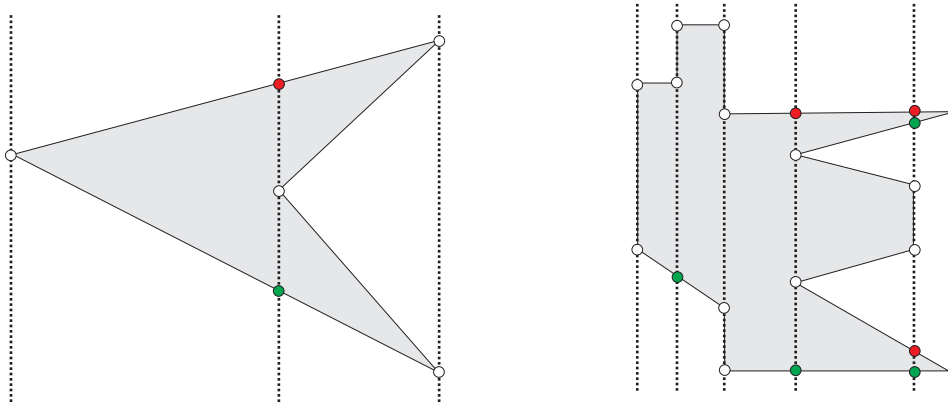


Figura 6.7: Intersecciones con rectas verticales en el caso de coincidencia con vértices y lados.

Relleno con polígonos obtenidos por paralelas al contorno

El proceso es más complicado en este caso anterior. Explicaremos brevemente cada etapa.

Paralelas a los lados

El sentido en que se recorre el lado $i \rightarrow f$ define la normal hacia afuera

$$\vec{n} = \sin \theta_i \vec{i} - \cos \theta_j \vec{j}$$

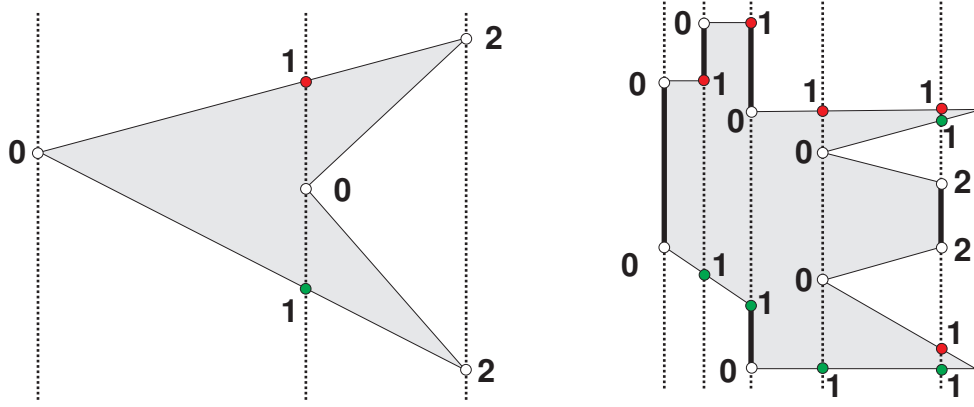


Figura 6.8: Número de intersecciones de los vértices que coinciden con una recta vertical.

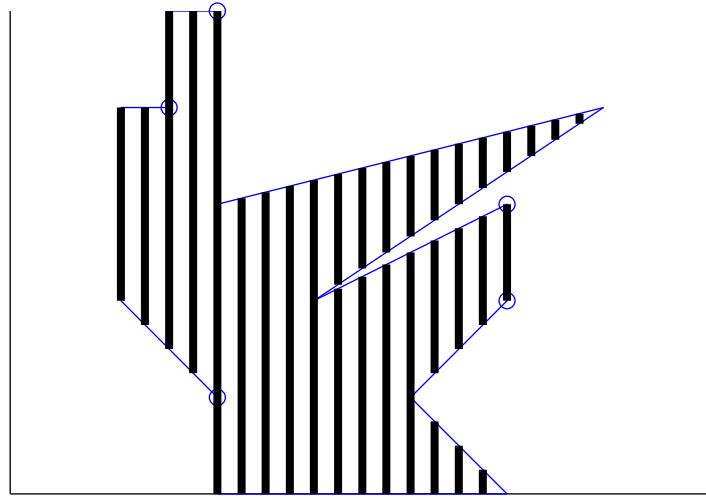


Figura 6.9: Resultado final del barrido con líneas verticales.

siendo $\theta = \arctan\left(\frac{y_f - y_i}{x_f - x_i}\right)$ el ángulo que forma el lado con el eje Ox . Entonces, trasladando los vértices i y f una distancia d en la dirección de la normal se obtienen dos puntos i', f' de coordenadas:

$$\begin{aligned}\vec{r}_{i'} &= (x_i + d \sin \theta) \vec{i} + (y_i - d \cos \theta) \vec{j} \\ \vec{r}_{f'} &= (x_f + d \sin \theta) \vec{i} + (y_f - d \cos \theta) \vec{j}\end{aligned}$$

Intersección entre dos lados.

Consideremos dos lados definidos por dos parejas de puntos: A y B para el primero, B y C para el segundo. Se trata de determinar el punto de intersección I de las rectas definidas por esos dos lados. Concretamente, la intersección de las rectas:

$$\begin{aligned}\vec{r}_1 &= \vec{r}_A + \lambda (\vec{r}_B - \vec{r}_A) \\ \vec{r}_2 &= \vec{r}_C + \mu (\vec{r}_B - \vec{r}_C)\end{aligned}$$

El punto de intersección cumple

$$\vec{r}_C - \vec{r}_A = \lambda (\vec{r}_B - \vec{r}_A) - \mu (\vec{r}_C - \vec{r}_B)$$

que se escribe en forma matricial como

$$\begin{bmatrix} x_C - x_A \\ y_C - y_A \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} \lambda \\ -\mu \end{bmatrix}$$

donde

$$M = \begin{bmatrix} x_B - x_A & x_D - x_C \\ y_B - y_A & y_D - y_C \end{bmatrix}$$

La solución del punto de intersección

$$\begin{bmatrix} \lambda \\ -\mu \end{bmatrix} = M^{-1} \begin{bmatrix} x_C - x_A \\ y_C - y_A \end{bmatrix}$$

requiere invertir la matriz M para lo cual su determinante no debe ser cero (el determinante es cero cuando los lados son paralelos). Los errores de redondeo introducidos por la utilización de números en coma flotante hace que al comparara el determinante con cero se obtenga el valor falso aun cuando los lados que estamos utilizando son paralelos. Para solventar este problema, en lugar de comparar con cero el determinante se compara el seno del ángulo ϕ que forman los lados,

$$\text{sen } \phi = \frac{||\vec{r}_{AB} \times \vec{r}_{CD}||}{||\vec{r}_{AB}|| ||\vec{r}_{CD}||} = \frac{\det \{M\}}{\sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2} \sqrt{(x_D - x_C)^2 + (y_D - y_C)^2}}$$

con un valor pequeño que se toma como tolerancia,

$$|\text{sen } \phi| < TOL$$

Cortes entre lados.

Para polígonos sencillos estos dos pasos: paralelas + intersecciones definen los lados de los polígonos nuevos (fig 6.10). En polígonos complejos (con zonas cóncavas y convexas) aparece el problema de que los lados del nuevo polígono se cortan entre sí (fig 6.11).

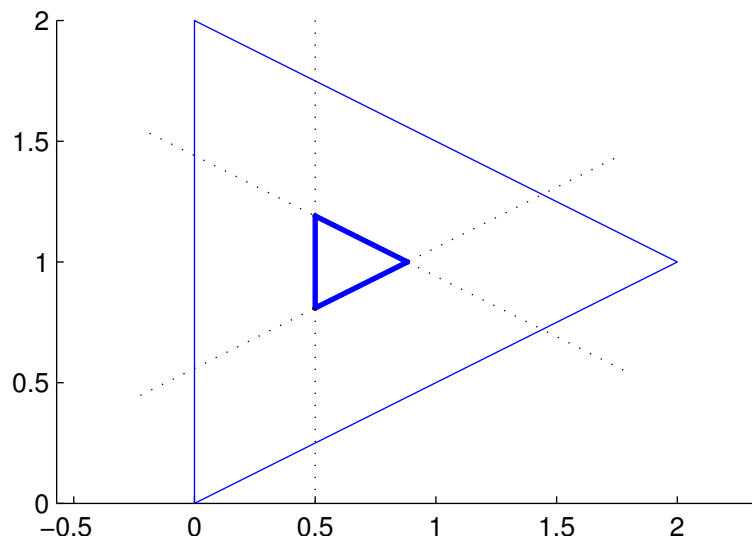


Figura 6.10: Un polígono sencillo con las paralelas hacia adentro, $d = -0,5$, dando lugar por intersección al triángulo pequeño del interior.

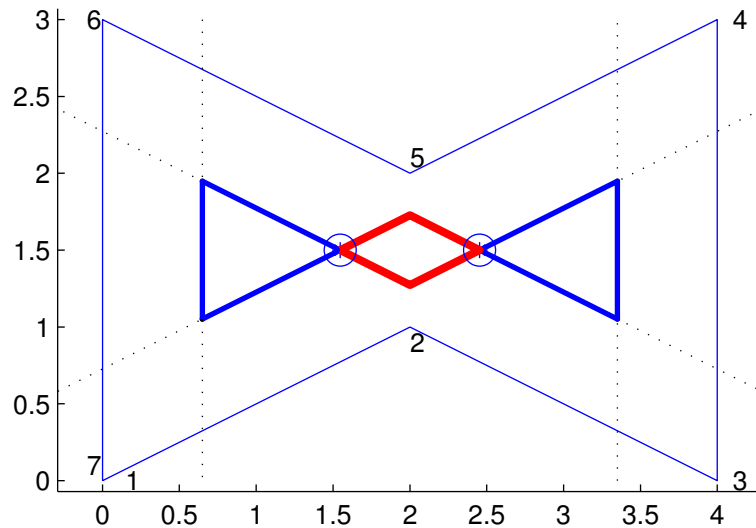


Figura 6.11: Un polígono con zonas cóncavas y convexas que da lugar a cortes en los lados de los polígonos. La numeración corresponde a los vértices en el sentido del recorrido.

Cuando los lados se cortan el polígono debe dividirse en varios polígonos que no se corten añadiendo como vértices las intersecciones de los lados. Para llevar a cabo esta tarea se hace una lista con los vértices del polígono y con los cortes entre los lados, estos últimos se introducen dos veces. En esa lista se indican los lados que se cortan en cada punto y los valores del parámetro de la recta λ y μ . Los valores de la tabla se ordenan de manera que el número del primer lado no decrezca, y para un valor del primer lado fijo, λ no decrezca. Un ejemplo de la tabla con los vértices y los cortes se presenta en el cuadro 6.1.

Cuadro 6.1: Tabla correspondiente a los vértices (v_i) y a los cortes (c_i) entre los lados del polígono de la figura 6.11.

tipo	l_i	l_f	λ	μ	x_i	y_i
c1	1,2	5,6	0.6641	0.3359	1.5466	1.5
v2	1,2	2,3	1	0	2	1.7267
c2	2,3	4,5	0.3359	0.6641	2.4534	1.5
v3	2,3	3,4	1	0	3.35	1.0517
v4	3,4	4,5	1	0	3.35	1.9483
c2	4,5	2,3	0.6641	0.3359	2.4534	1.5
v5	4,5	5,6	1	0	2	1.2733
c1	5,6	1,2	0.3359	0.6641	1.5466	1.5
v6	5,6	6,7	1	0	0.65	1.9483
v7	6,7	1,2	1	0	0.65	1.0517

Tomando los puntos de la tabla de manera el lado final de uno coincide con el inicial del siguiente se van formando los polígonos nuevos. En el caso de la figura 6.11 con dos intersecciones obtendríamos dos triángulos (de área positiva) y un rombo (de área negativa).

Inversión de la normal

Además de los cortes entre los lados existe otra complicación relacionada con la distancia a la que se trazan las paralelas, la inversión de la normal. Este proceso también se utilizará para

determinar el momento en que detener la iteración. Tomando como ejemplo el triángulo de la figura 6.10 pero aumentando la distancia hasta 0,75, se obtiene otro triángulo de área positiva pero el el que todos los lados se recorren en sentido opuesto al que se recorrían los lados del triángulo original, o lo que es lo mismo, cada uno de los nuevos lados tiene la normal opuesta a la original, véase figura 6.12. La normal puede invertirse en todos los lados, en ninguno o en varios.

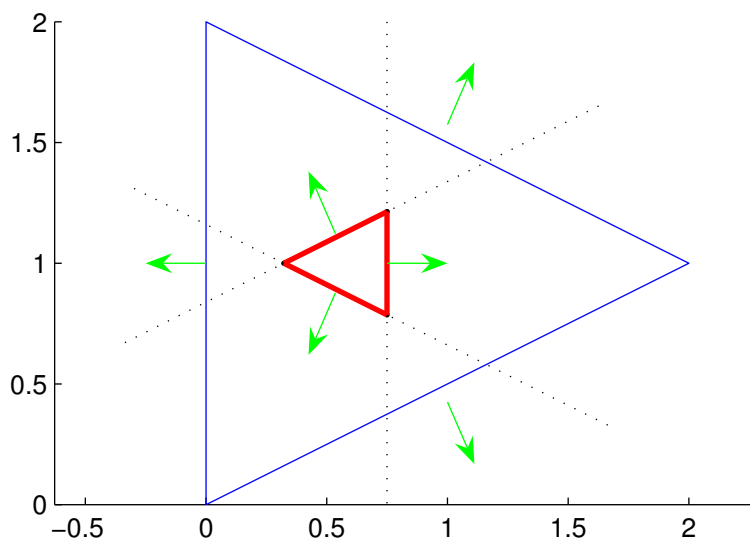


Figura 6.12: El mismo triángulo de la figura 6.10 pero con $d = -0,75$, da lugar a la inversión de todas las normales.

Los lados en los que se invierte la normal deben ser eliminados. Para ello lo primero que debe hacerse es agrupar aquellos que sean consecutivos para suprimirlos de golpe. Para cada grupo se busca la intersección del primero y el último con los lados anterior y posterior al grupo de los que invierte la normal. Si existe alguno de esos cortes se añade un vértice en dicho punto. Si en ese proceso solo se añade un punto, al inicio/final, se conserva el último/primeros de los vértices dentro del grupo de lados negativos. En la figura 6.13 se muestran algunos ejemplos.

En algunos casos, los lados que invierten la normal no pueden ser eliminados porque no existen los cortes con los lados anterior y/o posterior. Si esto ocurre el polígono debe descartarse.

Fin de la iteración

En el caso de que todos los lados de un polígono invierten la normal o si hay uno o más lados que invierten la normal y no pueden eliminarse según el método descrito anteriormente, el polígono debe descartarse y el proceso de iteración darse por finalizado.

Polígono con agujeros

Si el polígono tiene agujeros formados por polígonos de área negativa (recorridos en el sentido de las agujas del reloj) el método a aplicar es el siguiente. Se trazan las paralelas y se buscan las intersecciones de cada polígono (padre e hijos) por separado. Esto dará lugar a el mismo número de polígonos con el mismo número de vértices. Los cortes se buscan tomando los lados de todos los polígonos. Con los cortes y los vértices se construye la tabla que una vez ordenada dará lugar a un nuevo conjunto de polígonos. De estos polígonos se descartan aquellos en los que no pueden ser eliminados los lados en los que se invierte la normal (eso incluye el caso de que se inviertan las normales de todos los lados). Los polígonos restantes se agrupan en familias eliminando los padres de área negativa y los hijos de área positiva. El

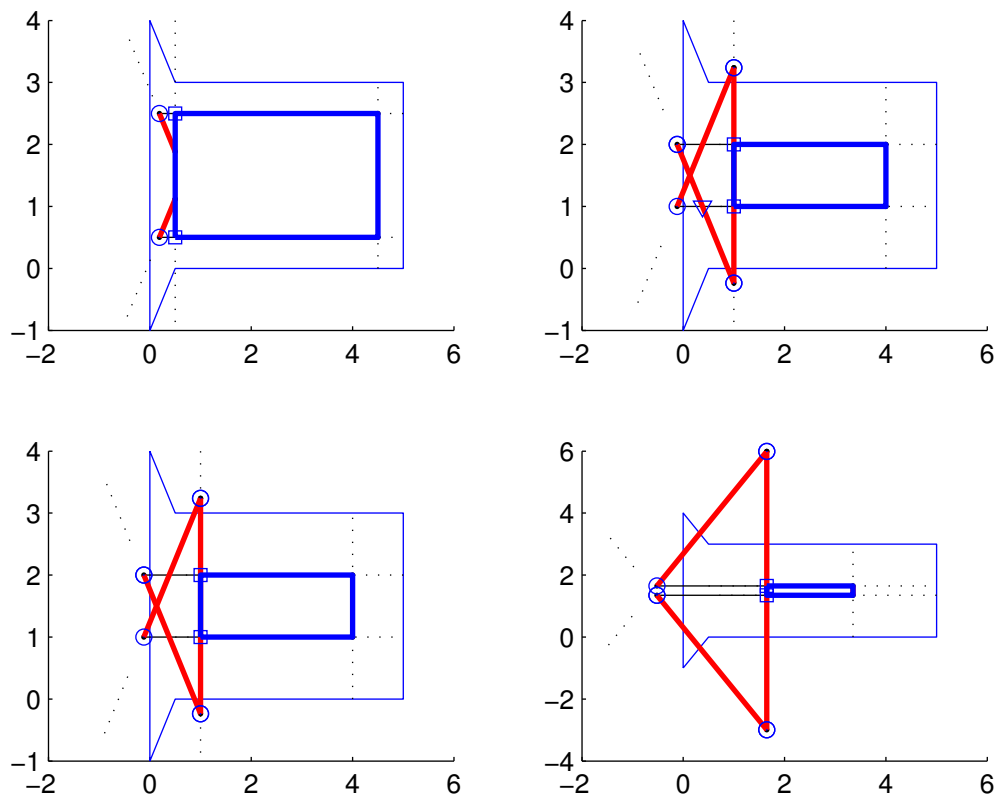


Figura 6.13: Ejemplos en los que los lados que invierten la normal pueden eliminarse añadiendo nuevos vértices. Los vértices añadidos se señalan con un cuadrado y los eliminados con un círculo.

conjunto de polígonos restante se tomará de partida para la siguiente iteración. El proceso se detiene cuando no quede ningún polígono que cumpla las condiciones citadas.

La figura 6.14 muestra algunos ejemplos áreas de polígonos rellenas por líneas paralelas al contorno. Puede apreciarse como el número de polígonos no se mantiene constante en todas las interacciones, aumentando y disminuyendo a medida que se cortan los lados o según se van rellenando ciertas áreas.

6.2.4. Fabricacion y relleno 3D empleando multiples volúmenes

Una vez obtenido el volumen formado por triángulos a partir de la conversión de la nube de puntos mediante la aplicación del algoritmo que permita generar una Triangularización de Delaunay, o bien directamente desde una geometría en formato STL, es posible generar las trayectorias de relleno como se establece en el punto anterior, efectuando cortes sucesivos a distintas alturas, que vendrán definidas por la altura que sea capaz de obtenerse mediante la técnica de adición, o la profundidad de surco mediante la técnica arranque de material. Como se ha descrito, hay casos particulares de fabricación que requieren el uso de una combinación de varios volúmenes, basados en la obtención de piezas a partir de la modificación de una pieza real añadiendo o eliminando material a la misma, o bien por reproducción completa del conjunto de volúmenes. A continuación se detallan los criterios que permiten determinar que efecto tendrán los polígonos que aparecen al efectuar los cortes en estos conjuntos.

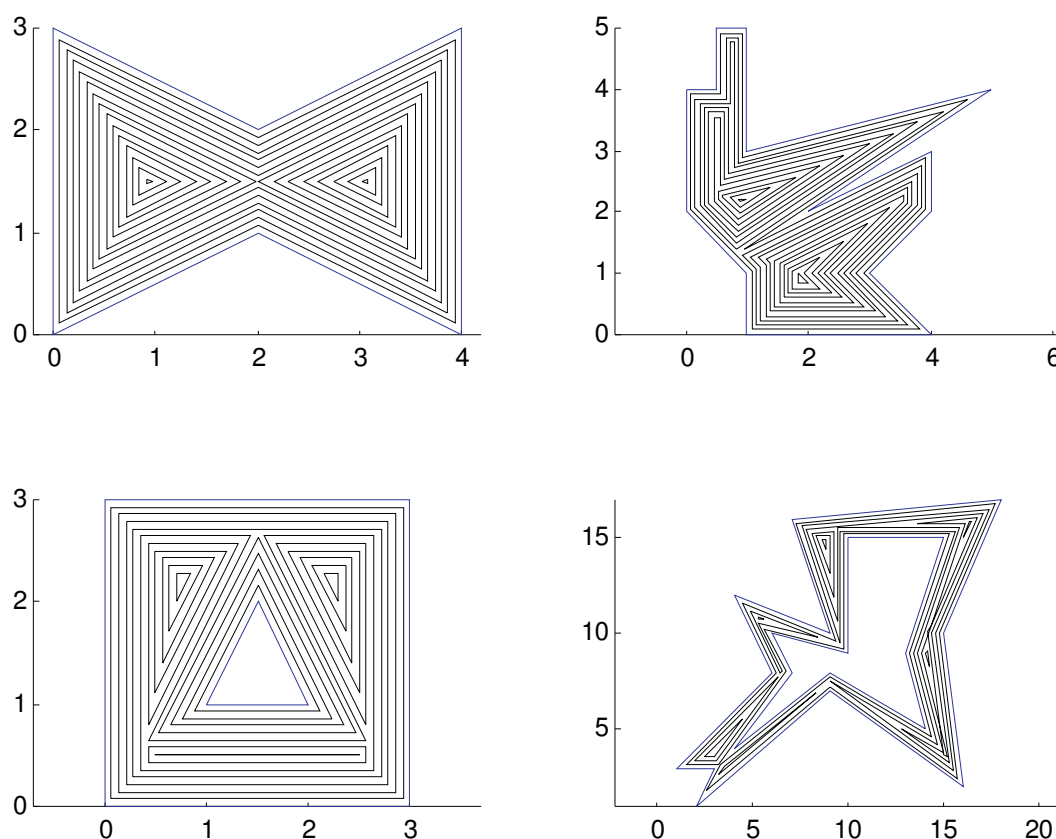


Figura 6.14: Ejemplos de relleno de polígonos con líneas paralelas al contorno.

Procedimiento general

Si se considera, partiendo de una pieza real escaneada, que se debe obtener una nueva pieza a partir de modificar la original añadiendo o eliminando material segun un modelo que llamaremos volumen objetivo, se deben dar los pasos siguientes para conseguir el volumen a generar sobre la pieza origen, que llamaremos volumen de transicion:

- El volumen de partida se definira a partir de la superficie escaneada, como un solido extruido hacia abajo, de modo que este tenga una profundidad equivalente al minimo valor medido en el eje Z , que llamaremos z_{min} .

Es importante tener en cuenta que es recomendable incluir los huecos presentes en el volumen objetivo a la hora de efectuar la extrusion de la superficie hasta el valor minimo comentado, ya que, dichos huecos, de modo general, no pueden ser medidos mediante el uso de la herramienta laser debido a encontrarse fuera del limite del mismo y/o cubiertos por el material constituyente de la propia pieza original.

- Se establecera un volumen de trabajo, donde se efectuaran los cortes, siendo su limite inferior el valor z_{min} antes mencionado, y su limite superior el valor z_{max} , que sera el maximo del conjunto de valores maximos medidos en el eje Z para el volumen objetivo y el volumen de partida.
- Se establecera un valor, z_{lim} , que sera el minimo del conjunto de valores maximos medidos en el eje Z para el volumen objetivo y el volumen de partida.
- Se llevaran a cabo sucesivos cortes en el volumen de partida y objetivo, combinando los poligonos procedentes de ambos volumenes, en funcion de su tipologia, para el rango del

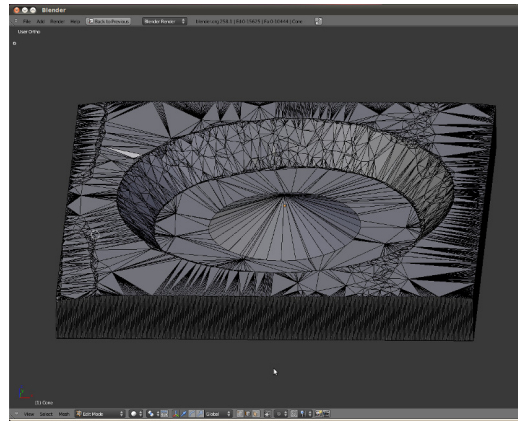
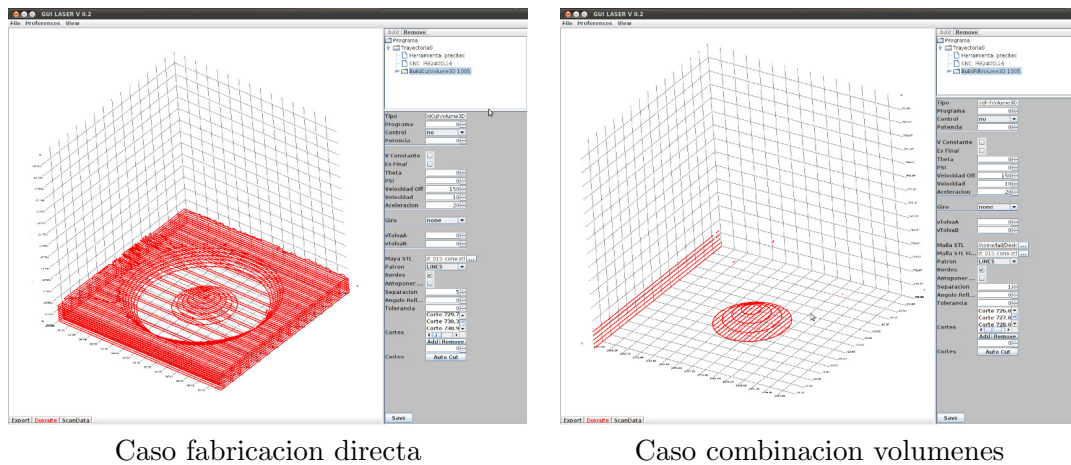


Figura 6.15: Ejemplo de modificación de pieza base y conversión de la nueva pieza a formato STL. Se ha añadido un cono aproximadamente en el centro del hueco presente



Caso fabricacion directa

Caso combinacion volumenes

Figura 6.16: Ejemplo de combinaciones de capas superpuestas que permiten obtener la nueva pieza por fabricacion directa o mediante modificación, por aporte de material, de la pieza original real.

eje Z que va desde z_{min} hasta z_{lim} . En este caso, el tratamiento de los poligonos sera diferente en funcion de los casos, estando estos descritos en detalle mas adelante.

- De igual manera, se llevaran a cabo sucesivos cortes en el volumen de partida u objetivo segun el caso, tratando los poligonos procedentes de volumenes, en funcion de su tipologia, para el rango del eje Z que va desde z_{lim} hasta z_{max} . En este caso se pueden dar dos situaciones:
 1. Si los poligonos procediesen del volumen objetivo, su tratamiento seria equivalente al de los obtenidos del corte de un volumen individual normal.
 2. Si los poligonos procediesen del volumen de partida, se ignorarian en el caso de usar unicamente una herramienta que permita efectuar solo el tratamiento de adicion de material, o bien unicamente el de arranque, ya que es algo existente en la pieza original que no puede ser eliminado o añadido, respectivamente.

Los casos descritos se centran en el uso de herramientas individuales de adicion o arranque, porque, en los casos de ejemplo que se ha probado la metodologia, asi estan configuradas. Es, sin embargo, posible plantear un escenario en que es factible el uso simultaneo de

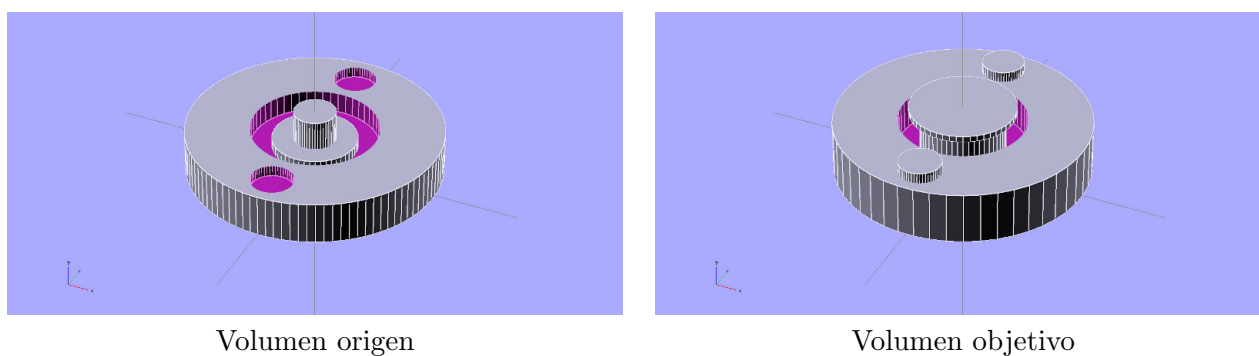


Figura 6.17: Caso de ejemplo, a la izquierda se muestra el modelo tridimensional de pieza de partida a la que se le añadirá material, a la derecha se muestra el modelo tridimensional de la pieza que se pretende obtener como resultado.

ambas herramientas para cada corte e integradas en el mismo sistema, de modo que tendrían que vincularse los desplazamientos asociados a polígonos sólidos a la herramienta de relleno y los asociados a polígonos huecos a la herramienta de vaciado, teniendo en cuenta que, para estos últimos, habría que indicar en qué casos es necesario realizar el arranque y en qué casos el hueco ya existe, además de ser factible la aparición de huecos sin sólido que los contenga. La adaptación de la metodología a este caso, aunque no trivial, no es aparentemente compleja, pero sí excede el alcance de este trabajo. Es importante reseñar que, a pesar de esta limitación, con la metodología actual sí sería posible realizar el trabajo de adición y arranque sobre la misma pieza sin más que emplear la metodología actual en dos iteraciones sucesivas, una para cada herramienta.

Calculo de áreas mediante diferencia de polígonos

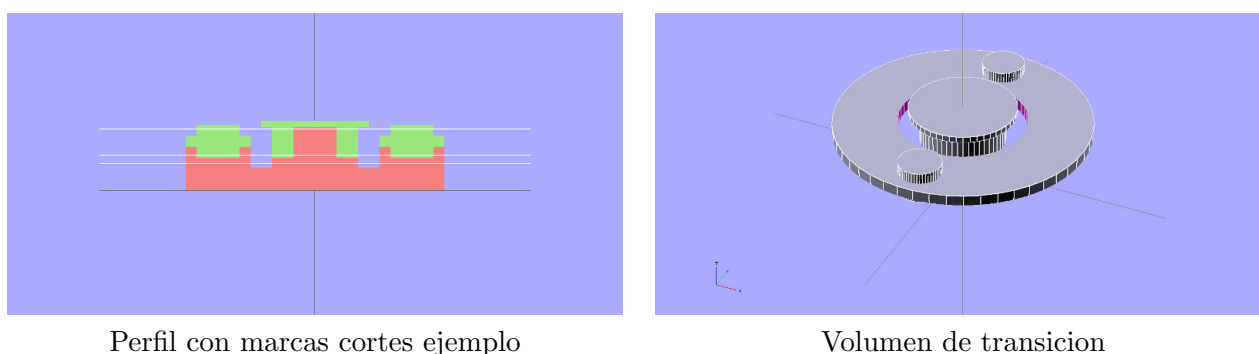


Figura 6.18: Caso de ejemplo, a la izquierda se muestra el perfil del volumen objetivo, que también puede visualizarse como combinación del volumen origen (en verde) y del volumen de transición (en rojo), donde se indican los planos de corte a distintas alturas, a la derecha se muestra un modelo tridimensional del volumen de transición.

Como se ha indicado previamente, en función de los polígonos obtenidos a partir del corte del volumen de partida y de origen, es posible encontrar varias situaciones que deben ser tratadas de modo adecuado, siendo el objetivo determinar el nuevo conjunto de polígonos que aparece, así como saber si representan sólidos o huecos. A continuación se detallan los casos que pueden aparecer de modo general:

- Si los polígonos coinciden en ambos volúmenes, tanto geoméricamente como a la hora de representar un elemento sólido o hueco, estos se anulan entre sí y no es necesario tenerlos en cuenta para el resultado del volumen de transición

- Los solidos individuales que aparecen en el volumen objetivo no contenidos en nign hueco seran considerados como solidos en el volumen de transicion
- Los huecos presentes en el volumen de partida que aparezcan dentro de solidos en el volumen objetivo pasaran a ser solidos en el volumen de transicion
- Los solidos del volumen objetivo que esten totalmente contenidos dentro de huecos del volumen de partida, pasaran a ser solidos en el volumen de transicion.
- Los solidos del volumen de partida que esten totalmente contenidos dentro de huecos del volumen objetivo se ignoraran por ya estar presentes en la pieza origen.
- Los solidos presentes en el volumen de partida que esten totalmente contenidos dentro de un solido en el volumen objetivo deben ser considerados como huecos.
- Los solidos presentes en el volumen objetivo que esten totalmente contenidos dentro de un solido en el volumen de partida se ignoraran por la misma causa que la expuesta previamente, puesto que, una vez mas, en el caso de usar unicamente una herramienta que permita efectuar solo el tratamiento de adiccion de material, o bien unicamente el de arranque, ya que el material que rodea al poligono que se pretende obtener es algo existente en la pieza original que no puede ser eliminado o añadido.
- Los poligonos solidos del volumen de partida, con algun vertice coincidente con uno de los vertices de un poligono solido del volumen objetivo, o bien, contenido en las aristas de un poligono solido del volumen objetivo, daran origen a uno o mas poligonos. Dichos poligonos seran obtenidos al aplicar el algoritmo de obtencion de poligonos diferenciales, que se detallara a continuacion, y permitira efectuar solo el procesado de las partes no presentes en la pieza original.

Algoritmo de obtencion de poligonos diferenciales

Como se ha mencionando anteriormente, el objetivo es determinar las nuevas areas generadas al efectuar la combinacion de dos areas, que coinciden parcialmente en el espacio, considerando una como negativa y otra como positiva, a fin de determinar que zona es necesario procesar con la herramienta. El criterio de obtencion de estas nuevas areas pasa por realizar los siguientes pasos:

- Buscar los vertices del poligono del volumen de partida, que en este caso consideraremos negativo, contenidos en alguna de las aristas del poligono del volumen objetivo, que en este caso consideraremos positivo, formando un cruce.
- Una vez encontrados los vertices descritos en el punto anterior, se tomara todos aquellos vertices que se encuentren entre dos cruces, tanto para el poligono positivo como para el poligono negativo, añadiendo a su vez los vertices considerados de cruce a esta secuencia siempre y cuando no coincidan con uno ya incluido.
- Si se cumple la condicion de que entre vertices contenidos existen vertices no contenidos se generara un nuevo poligono
- Si se cumple la condicion de que dos vertices contenidos no sucesivos se encuentran contenidos en la misma arista, el poligono generado se cierra simplemente uniendo los dos vertices contenidos a los vertices no contenidos entre ellos

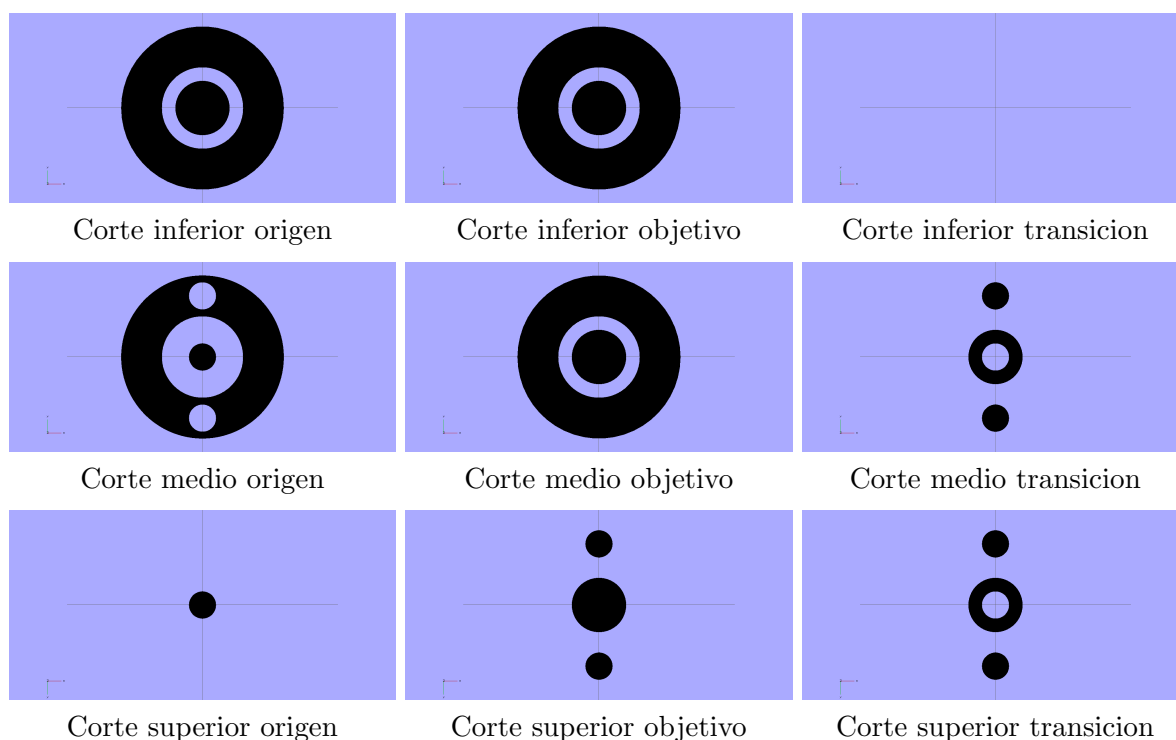


Figura 6.19: Caso de ejemplo, se obtienen los cortes correspondientes a las diferentes líneas marcadas en el perfil anteriormente mostrado. Se aplican, para cada fila, los criterios descritos al conjunto de polígonos obtenidos de realizar el corte del volumen origen (geometría de la izquierda) y del volumen objetivo (geometría central) para generar el corte del que sería el volumen de transición, esto es, los polígonos que deben ser realmente procesados por la herramienta (geometría de la derecha)

- Si se cumple la condición de que dos vértices contenidos sucesivos no se encuentren contenidos en la misma arista, se tomarán dichos vértices, siempre y cuando no coincidan con cualquiera de los vértices inicial o final que dan lugar a las aristas, junto con aquellos vértices del polígono de área mayor, obtenidos a partir de los cortes de las aristas entre sí. Adicionalmente, se desecharán los vértices contenidos en las aristas del polígono de área menor.

Es importante reseñar que debe respetarse el sentido de recorrido de los vértices asociado a sus polígonos originales y debe seleccionarse el conjunto de grupos de vértices que permita dar origen a un nuevo polígono con sentido de recorrido homogéneo.

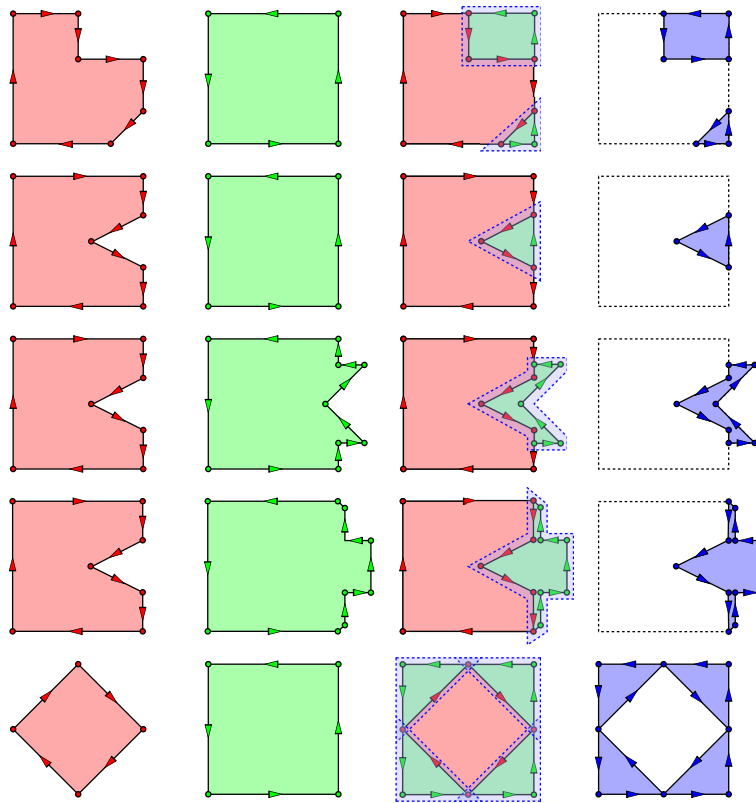


Figura 6.20: Ejemplos de obtencion de poligonos diferenciales. Las geometrias se han seleccionado de modo que sean representativas y permitan mejorar la comprension del algoritmo descrito

Capítulo 7

Resultados experimentales

A continuacion se describen varios ejemplos de uso del sistema, en los que se muestra la utilidad practica del mismo, asi como los beneficios derivados de implementar la metodologia comentada a lo largo de este trabajo.

7.1. Ejemplo de recubrimiento de materiales compuestos con diferente concentracion

Como se ha comentado anteriormente, uno de los elementos auxiliares de cladding a controlar mediante el sistema es el conjunto de tolvas de suministro de polvo. En este caso, la implementacion del sistema ha permitido que se pueda programar como un proceso automatico no solo el encendido y apagado automatico de las tolvas, si no tambien el flujo de material que se establece en cada una de las tolvas del sistema, pudiendo cambiar dichos valores dinamicamente durante el tratamiento. Esta opcion hace posible la obtencion de capas con distinta composicion de modo sencillo y permite la integracion de materiales con distintas propiedades en diferentes partes de una misma pieza.

En el ejemplo se muestran cuatro cortes de capas realizadas con diferente concentracion mezclando dos tipos de polvo distintos, que se han empleado para determinar la resistencia al desgaste, la distribucion tipica de las incrustaciones de carburos, aparicion de grietas, etc.

Esta funcionalidad del sistema ha dado lugar posteriormente a diferentes trabajos en el ambito academico, entre ellos cabe destacar el desarrollado por J. M. Amado (ver [5])

7.2. Ejemplo de muestreo y efecto de sistema de control

A continuacion se muestran dos ejemplos de uso del sistema de control de lazo cerrado PID, comparando los resultados con los obtenidos empleando el sistema en lazo abierto. Es importante destacar que, en ambos casos, los parametros del sistema de control no han sido optimizados para el material, velocidad y separacion entre cordones, ya que no se trata de piezas reales de produccion, si no de ejemplos academicos que permiten validar el funcionamiento del sistema, observando que, como era de esperar, se obtiene un resultado mas homoganeo, predecible, repetible y continuo a lo largo de las distintas etapas del proceso.

En ambos casos el controlador variara dinamicamente el valor de la potencia de salida del laser intentando mantener con el valor de consigna a lo largo del proceso la señal del fotodiodo, que como se ha indicado previamente, mide la intensidad global de luz emitida durante el proceso de cladding, la cual esta relacionada con la temperatura y ancho del cordon.

Se ha comprobado que el uso de un PID con valores constantes, tanto de parametros como de consigna, a lo largo de todos los pasos del tratamiento conduce a resultados no optimos,

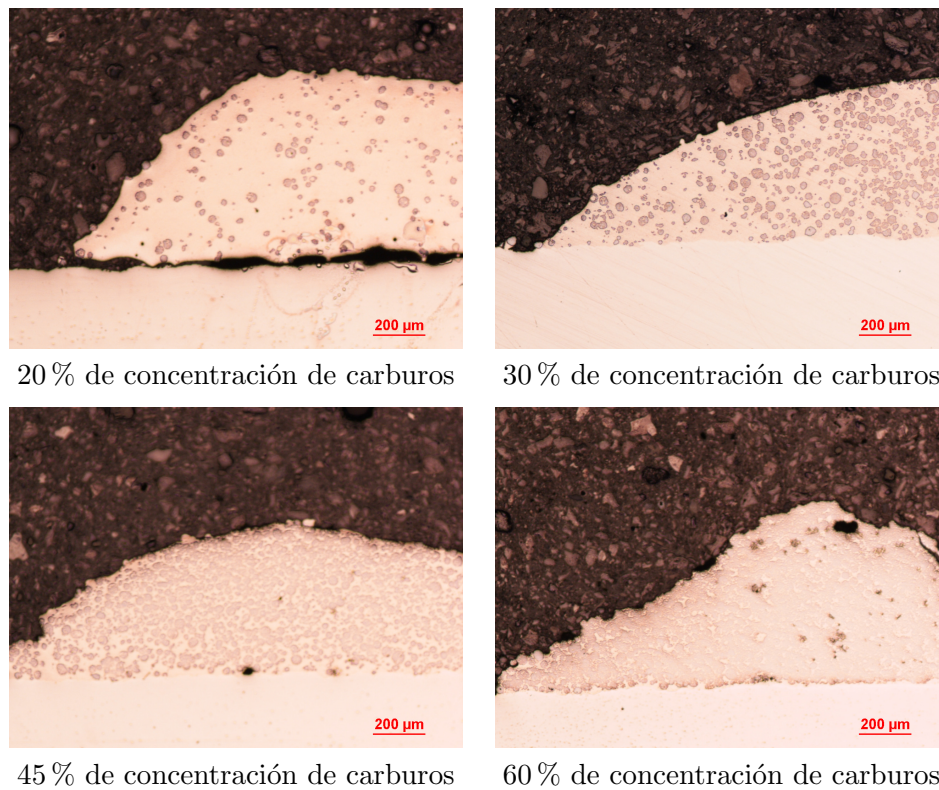


Figura 7.1: Ejemplo de capas de recubrimiento con contenido de carburos en diferentes grados de concentracion obtenidos mediante el uso del sistema de modo automatico

debido, entre otras cosas, a que las condiciones iniciales cambian rapidamente una vez comienza el proceso, puesto que la temperatura inicial de la pieza no coincide con la posterior de trabajo una vez ha comenzado la fusion de material, o bien cambia el sustrato de manera apreciable, tanto por su geometria como por su composicion. En los dos casos comentados puede apreciarse el efecto de estos transitorios en las primeras etapas del proceso. Aunque el sistema tiene la capacidad de modificar los parametros de modo dinamico, ya se ha mencionado que el ajuste de los mismos a las distintas piezas y materiales disponibles en el laboratorio excede el alcance de este trabajo, limitandose este a indicar la existencia del problema y dotar al usuario de una herramienta que permita resolverlo.

Ambos ejemplos han sido incluidos en trabajos presentados en diferentes congresos del sector (ver [23], [24] y [45]) a fin de mostrar el impacto del sistema de control funcionando en lazo cerrado en un caso experimental.

7.2.1. Caso de recubrimiento de tubo

El ejemplo de un recubrimiento de un tubo de pared fina se ha realizado, fundamentalmente, porque la tecnica tradicional de recargue por soldadura manual o plaqueado no es sencilla de aplicar en este caso, demostrando mediante este ejemplo lo adecuado de la tecnica de recargue por soldadura laser o cladding para la realizacion de piezas de tamaños diversos, incluidos los tipicamente demasiado pequeños para los procesos habituales. Esto ultimo se debe particularmente al menor impacto termico en la pieza, siendo todavia mas cierto en el caso del uso del sistema de control en lazo cerrado, como se indicara a continuacion.

Al llevar a cabo el tratamiento sobre la pieza con el sistema de control funcionando en lazo abierto, se observa la existencia de unos picos que aparecen en la señal del fotodiodo, estos se producen de forma periodica y coincidiendo el periodo de los mismos con el de rotacion del sistema, siendo esto debido a que en ese punto se produce la mayor superposicion con el cordón

del paso anterior. Existe además una tendencia ascendente clara de dicha señal a lo largo de todo el proceso, lo cual implica que la temperatura del tubo aumenta a medida que se realiza el proceso, lo cual implica que al conservar la potencia del laser constante, la cantidad de material depositado tendera a aumentar, o bien el grado de dilucion variara. Se aprecia en este caso el mismo efecto que se ha comentado debido al transitorio de un exceso de dilucion y mayor profundidad al iniciarse el proceso, así como una altura irregular del recubrimiento y distinta profundidad de penetracion durante la evolucion del mismo.

En relacion al tratamiento sobre la pieza con el sistema de control funcionando en lazo cerrado, se observa que, tanto la altura como el area de dilucion del cordón y la profundidad de penetracion son constantes a lo largo del proceso, salvo en la zona en que se produce el periodo transitorio desde que comienza el proceso hasta que este logra estabilizarse. Como se ha comentado y se puede apreciar en los valores de potencia generados, existe una zona en la que emplear el valor de consigna que se ha considerado como adecuado para el proceso globalmente produce saltos hasta que se establece un solape entre cordones similares periodico. Logicamente, el valor de potencia es descendente hasta que se alcanza una zona de equilibrio, que se mantiene variando suavemente dicho valor, lo cual es coherente con lo observado en el caso previo de lazo abierto, en que se observaba un efecto de calentamiento gradual de la pieza, que aqui se reduce unicamente al necesario para fundir el material en las condiciones deseadas.

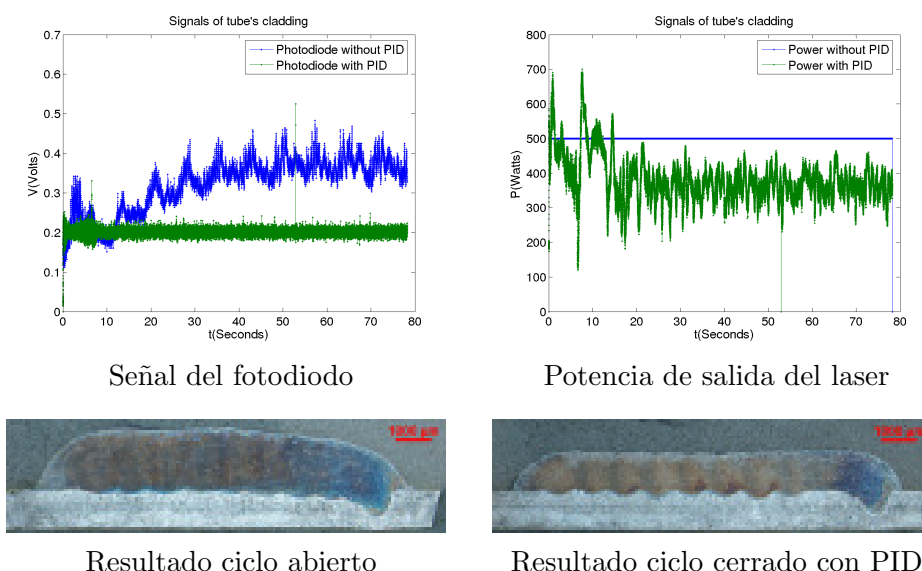


Figura 7.2: Ejemplo de resultados obtenidos mediante lazo abierto y lazo cerrado en el recubrimiento de tubo metalico con pared de pequeño espesor

7.2.2. Caso de fabricacion de pared vertical

El ejemplo de fabricacion de pared vertical se ha realizado porque, cuando se pretende realizar la fabricacion de piezas complejas de tamaño indeterminado, es necesario que no exista una limitacion en la altura de la misma, mas alla de la propia de los elementos fisicos que componen el sistema y/o las propiedades del material base y de aportacion. La tecnica pasa por el apilado sucesivo de cordones, intentando que las distintas capas sean lo mas homogeneas posibles, pero, se observa una serie de defectos en el resultado si el proceso se realiza simplemente manteniendo constantes la potencia y diferencial de altura entre cordones.

En el caso de uso del sistema de control en lazo abierto, se observa que el tratamiento genera una pared con espesor no constante, aumentando este a medida que la altura de la pared crece, obteniendo una parte inferior con peores propiedades mecanicas que el resto de la pieza, siendo

ademas el area que se emplea para sustentar la pieza mientras se fabrica y, reduciendo por tanto, la altura maxima permitida. Adicionalmente, se produce otro efecto con un impacto importante en la maxima altura que es posible alcanzar, ya que se observa la presencia de un transitorio que provoca una sobreelevacion seguida de una bajada al principio de cada uno de los cordones, siendo este otro ejemplo del caso comentado previamente, debido a la diferencia entre las condiciones iniciales y las que se dan durante el proceso. Este ultimo efecto se hace mas acusado a medida que se añaden mas capas, hasta el punto de imposibilitar la deposicion de material a una altura constante sobre la pieza.

En el caso de uso del sistema de control en lazo cerrado, se subsanan los defectos observados en el caso anterior, obteniendose un espesor y altura de pared de valor constante. Se observa que la primera capa, sobre todo si se compara con el experimento de lazo abierto, tiene un nivel de penetracion y dilucion en el material base notablemente mayor, esto es debido a que se ha empleado un valor constante de consigna para todas las capas, cuando la primera y segunda probablemente deberian realizarse con consigna y parametros PID diferentes, optimizados para cada caso concreto, puesto que el material base sobre el que se deposita el cordon varia, asi como la geometria.

En ambos casos se observa un efecto adicional de inclinacion en la parte final de la pared, reduciendose la longitud total de esta a medida que la altura aumenta. Esto es debido al apagado instantaneo del laser y al proceso de solidificacion del material, con lo que, para subsanarlo, habria que llevar a cabo un proceso de cambio gradual de potencia, o bien extender la linea lo que fuese necesario en pasadas sucesivas para cubrir la zona que no recibe material cuando el apagado es mas brusco.

Aunque el proceso, a priori, deberia poder realizarse empleando un valor constante de salto entre lineas, simplemente elevando la herramienta dicho valor, se ha observado que no es el caso, ni siquiera en el tratamiento empleando el lazo cerrado, probablemente debido a que el proceso es complejo y entran en juego variables como la cantidad de polvo depositado, el efecto del radio de la superficie que se emplea como base, la temperatura del material y otras. Para subsanar este problema, es sencillo establecer un procedimiento de medida, previa a la deposicion del siguiente cordon, mediante el uso del escaner laser, como se ha indicado en capitulos precedentes, a fin de establecer el origen real del mismo, en lugar de emplear un valor de elevacion constante entre pasos, estando el sistema actualmente capacitado para realizar esta tarea de modo semiautomatico.

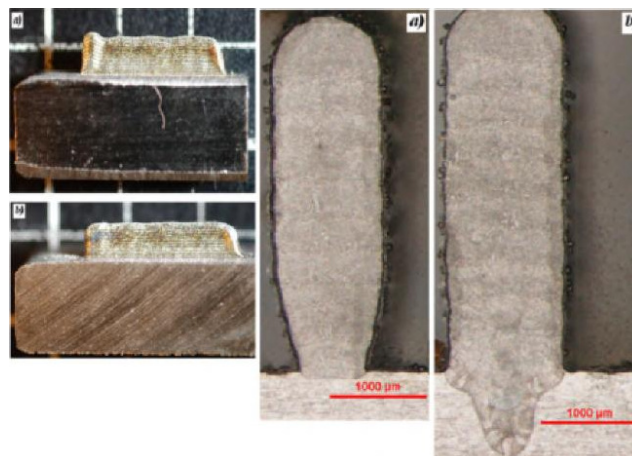


Figura 7.3: Ejemplo de resultados obtenidos mediante lazo abierto y lazo cerrado en la fabricacion de paredes verticales

7.3. Ejemplo de mapeo de superficie

La tarea fundamental del sistema de escaneo por laser es obtener la geometria de la pieza a tratar, o bien de la pieza tratada. El uso y tratamiento posterior de la informacion suministrada puede variar, existiendo multiples alternativas, probablemente incluso mas que las ya comentadas, pero la simple posibilidad de efectuar distintos analisis no destructivos de estado previo, final e incluso, en algunos casos, de transitorios de la geometria de la pieza, es valioso en si mismo.

Adicionalmente, como ya se ha mencionado, el uso de esta herramienta permite la realizacion del historico de las distintas etapas por las que pasa una pieza que sufre distintos tratamientos, manteniendo informacion cuantitativa, no solo cualitativa, de la superficie de la misma.

A continuacion se detalla brevemente un ejemplo de analisis de un proceso de soldadura hibrida laser/MAG, que es totalmente extrapolable a otros casos de tratamiento por laser como el cladding, en el que el propio mapeado de la superficie se emplea para determinar las tolerancias maximas admisibles en juntas desde un punto de vista puramente industrial, asi como para proponer una hipotesis que describa los fenomenos fisicos que gobiernan el proceso. El analisis completo y pormenorizado de los experimentos entre los que se encuentra el ejemplo descrito, en combinacion con imagenes obtenidas a traves de camaras de alta velocidad, ha dado lugar a diversas publicaciones (ver [32], [31], [33] y [39]).

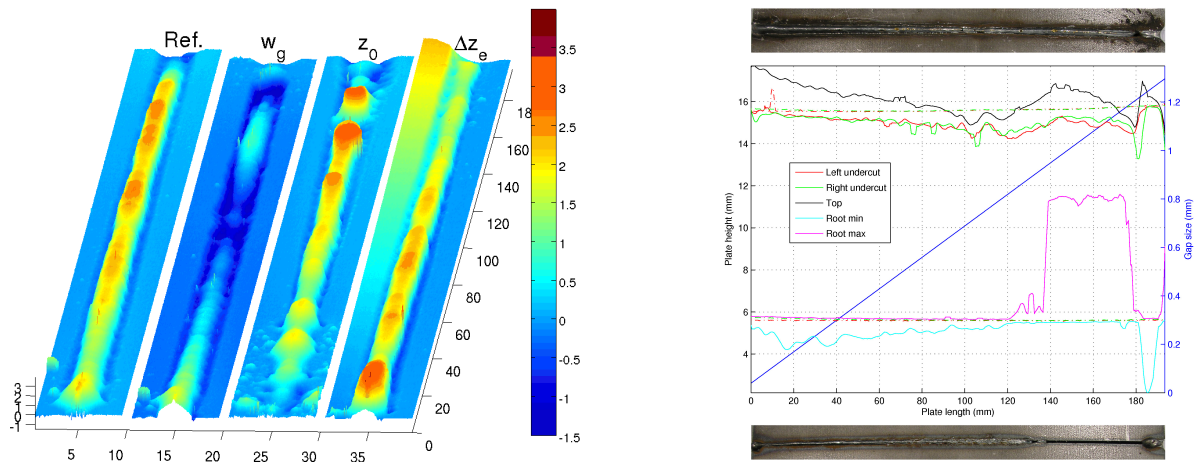
7.3.1. Caso de uso para analisis cuantitativo de soldadura hibrida

El objetivo buscado al escanear la superficie en este caso es determinar los valores de altura que alcanza el cordon en cada una de las posiciones, tanto en la cara superior como en la cara inferior de la pieza. La combinacion de ambas superficies, teniendo en cuenta que el espesor de las chapas soldadas es conocida, permite obtener el equivalente a la envolvente de la metalografia en cualquier punto de la geometria, sin la informacion de poros, HAZ y dilucion, pero a cambio es una tecnica no destructiva.

En los experimentos mostrados se ha generado un valor patron de referencia y, de modo deliberado, tres defectos geometricos (ancho de union o gap, distancia de la herramienta a la pieza y diferencia de altura entre placas) controlados diferentes que aumentan de modo gradual, a fin de determinar los efectos que tienen sobre el resultado final y como afectan al flujo de metal fundido, asi como determinar para cada uno de ellos el valor umbral a partir del cual se produce un deficit de calidad en la pieza que la hace no valida. En este caso, el criterio empleado para determinar si una pieza es valida o no sera la profundidad de las mordeduras o undercuts, por lo que es necesario conocer su valor con respecto del borde de la chapa.

Para el caso en que se modifica el ancho de la union o gap, por ser especialmente representativo, se ha incluido la medida con los maximos y/o minimos del perfil segun el parametro que sea necesario cuantificar, en ambas caras, mostrando su relacion con las fotos de la superficie y el valor de ancho de la union en cada punto. La obtencion del umbral es directa sin mas que establecer el valor minimo aceptable para la mordedura y es observable el efecto de cambio de pendiente debido al fallo de penetracion completa que se puede detectar tambien en las fotografias, asi como el plantear que el mecanismo que regula dicho fallo es debido a la distancia entre paredes y la falta de interaccion laser-arco-material en la zona por ser esta excesiva.

El metodo empleado para obtener los valores de los puntos no escaneados se ha basado en la generacion de splines para cada perfil, puesto que este caso cumple los supuestos relativos a continuidad de modo general, al tratarse de un cordon de soldadura continuo.



Representacion tridimensional de superficies escaneadas Grafica medidas con relacion fotografia real

Figura 7.4: Ejemplo de resultados obtenidos mediante el uso de un escaner laser y tratamiento de nube de puntos para obtener las medidas reales de cordones realizados mediante soldadura hibrida

7.4. Ejemplo de proceso de generacion de trayectorias a partir de una superficie escaneada

A continuacion se muestra una secuencia en la que se puede observar el proceso completo que permitira el tratamiento directo de piezas reales, sin necesidad de conocimiento previo de la geometria de la pieza.

Este proceso era parte de los objetivos principales a cubrir con la herramienta y la metodologia estudiada en este trabajo, por lo que se muestra de manera resumida la forma de llevar a cabo la tarea.

Este procedimiento ha demostrado ser interesante para varias empresas de diversos sectores, especialmente pintura, limpieza y recubrimiento por proyeccion, en los que puede ser factible emplear robots u otros desplazadores para llevar a cabo procesos de modo automatizado sobre piezas unicas o series cortas de piezas de elevada complejidad. Dichas empresas han solicitado informacion al respecto, se han llevado a cabo demostraciones y explicado el uso del sistema con una buena acogida. Esta en tramite de constitucion una spin-off ¹ basada en este concepto a fin de transferir, comercializar y explotar la herramienta para otros procesos y ambitos industriales. Adicionalmente, ya se ha comenzado el proceso para llevar a cabo la proteccion intelectual del software desarrollado hasta el momento.

Por ultimo, es pertinente indicar que el desarrollo de estos procesos, asi como parte de los resultados mostrados, han dado lugar a produccion cientifica (ver [28] y [3])

7.4.1. Obtencion de superficie escaneada

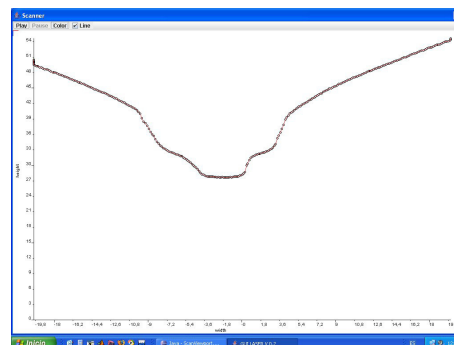
Se colocara la pieza en una posicion que permita su mapeado, esta debe estar dentro del rango de uso del robot y los limites de la herramienta de medida. La primera parte del proceso consiste en comprobar mediante el uso del software, empleando el modulo del mismo que permite obtener los perfiles de modo dinamico, si la pieza tiene partes a medir que esten fuera de los limites anteriormente comentados, asi como establecer los valores del cubo en que se encuentra circunscrita la pieza. Una vez indicados estos parametros, el proceso es automatico, desplazandose el robot sobre la pieza tantas veces como sea necesario para obtener la superficie

¹Versabotics Technologies: Es posible encontrar mas informacion al respecto en la web indicada.

https://www.udc.es/otri/empresas_base_tecnologica/empresas_da_UDC/Versabotics_Technologies.html

completa, y, una vez se termina el proceso que se ha indicado previamente de modo detallado, se obtiene la nube de puntos que permite generar las trayectorias.

En este caso, como se puede apreciar en la figura correspondiente, la pieza a escanear es un diente de excavadora. Se ha seleccionado por lo complejo de su geometría y por ser considerado un ejemplo representativo de la tipología de piezas y materiales empleados en el ámbito industrial, mas que por la utilidad práctica real que tenga el efectuar un tratamiento por láser del mismo a nivel de producción.



Posicionamiento del escaner sobre la pieza Medida de perfil dinámico de posición actual

Figura 7.5: Ejemplo de caso que permite la obtención de superficie escaneada de diente de excavadora

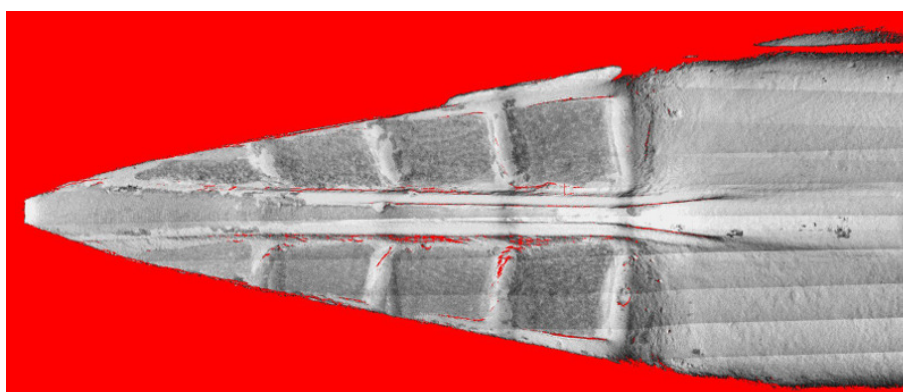


Figura 7.6: Superficie escaneada sin tratar de diente de excavadora. En ella se pueden observar las uniones entre las múltiples pasadas del escaner necesarias para obtener el mapa completo debido a la anchura de la pieza. Los puntos rojos representan aquellos que no han podido ser obtenidos de modo directo o superponiendo nubes de puntos

7.4.2. Generación de trayectorias

Una vez obtenida la nube de puntos, se puede emplear como base para generar trayectorias de diversas formas, como se ha descrito anteriormente, en función del tratamiento que se desee dar a la pieza.

En el caso de ejemplo, se trata de efectuar un recubrimiento de ciertas áreas de la pieza con una única capa de material, a fin de reforzar su resistencia al desgaste en las zonas donde este se produce con mayor frecuencia. En el diente de excavadora, estas áreas coinciden con las zonas laterales del mismo, que tienen una inclinación no constante, recordando a una superficie alabeada de la que se desconoce el conjunto de ecuaciones que permitirían su representación.

El procedimiento es sencillo, basta crear un nuevo elemento tipo relleno, definir los vertices del area a tratar, o bien escribiendo sus coordenadas, o bien directamente sobre la representacion de la pieza vista de modo cenital. Una vez hecho esto, el elemento es editable y basta establecer la tipologia y parametros del recubrimiento en funcion del caso. Este proceso debe repetirse para todas las areas que sea necesario procesar, aunque basta copiar las anteriores para no tener que volver a introducir la tipologia y parametros si estos fuesen identicos.

Cuando ya se dispone del conjunto de trayectorias a recorrer, se efectua la conversion de las mismas a comandos del sistema de desplazamiento, incluyendo las asociadas a los elementos de la periferia, comprobando ademas que no se superaran las limitaciones mecanicas y que existe la posibilidad de llevar a cabo los movimientos con la pieza en su posicion actual. Desde el momento de su escaneado, las coordenadas de la superficie se obtienen en relacion al sistema de referencia absoluto del equipo, siendo en este punto donde las asociadas a las trayectorias, se convertiran de modo automatico al sistema de referencia de la herramienta. Una vez terminado el proceso de conversion, basta indicar al sistema que se debe comenzar el tratamiento, siendo el tratamiento absolutamente autonomo desde este momento, salvo que sea necesario cargar las tolvas con mas material de aportacion.

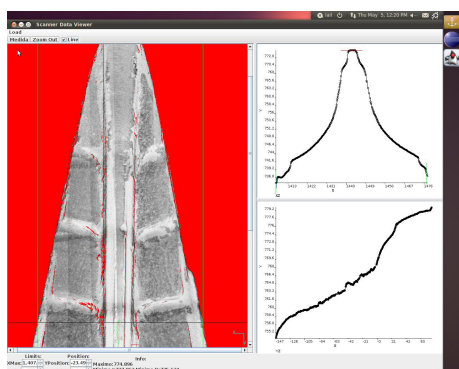
La pieza final procesada presentara areas de tratamiento donde se haya establecido y, en caso de que fuese necesario, puede realizarse un segundo escaneado a fin de obtener la nueva superficie, lo cual permitiria medir el espesor de las capas a fin de determinar el rendimiento del proceso, realizar un control de calidad de los resultados, o incluso emplear dicha superficie para realizar una nueva etapa de tratamiento asociada con la misma u otra tecnica.

Como se puede observar, se ha diseñado el procedimiento de modo que un usuario no necesite un conocimiento especifico del funcionamiento del sistema de desplazamiento, el escaner o periferia asociada, mas alla de los limites fisicos de los mismos, teniendo que preocuparse unicamente de definir correctamente los parametros intrinsecos del proceso de tratamiento seleccionado.

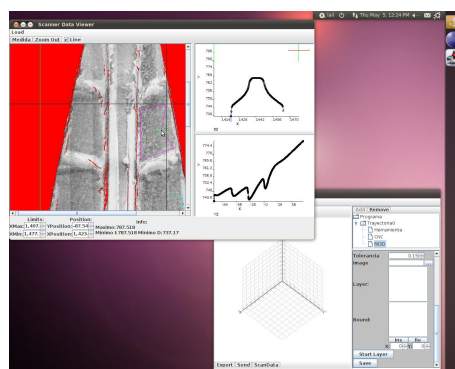
7.4.3. Caso de uso de recorrido de trayectoria sobre alabe con brazo robotico

La pieza sobre la que se va a realizar el proceso se mapea utilizando el escáner montado en el robot. Para piezas cuya anchura sea superior a los 40mm del ancho de la línea del escáner disponible, será necesario realizar varias pasadas paralelas que después deben ser solapadas. En la figura se muestra la imagen obtenida a partir de los valores de la reflectividad de 4 pasadas sucesivas sobre un alabe de una turbina en las que se aprecia claramente la marca blanca realizada sobre la superficie para definir la trayectoria que queremos que recorra la herramienta, permaneciendo ademas en todo momento en direccion perpendicular a dicha superficie. El cambio de brillo que se observa al comparar las distintas zonas del alabe no se debe a que la superficie no sea uniforme sino a que el escáner ajusta de manera automática la intensidad del láser en función de la luz reflejada en cada instante.

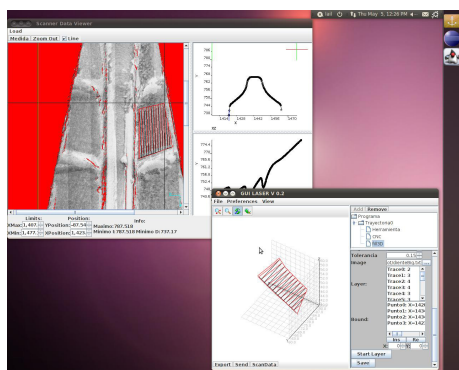
A pesar de que la imagen en escala de grises solo tiene 4 bits es posible localizar de fácilmente la marca blanca y obtener las coordenadas XYZ de los puntos que la definen. Los datos del escáner se ven afectados por la reflectividad del material que hace que las posiciones de la línea que corresponde a la marca blanca tengan una dispersión que, en este caso, se ha mitigado mediante un suavizado, dicho proceso se ha realizado simplemente tomando un 10% de los datos porque la superficie tiene un valor de pendiente lo bastante suave como para que no suponga una perdida de informacion que afecte demasiado al resultado final. Los nuevos datos suavizados pueden ajustarse a polinomios que determinarán la curva a la que se ha de aproximar la trayectoria. El grado de los polinomios se elige de manera que la distancia a los puntos suavizados se encuentre por debajo de un límite que asegure una colocación adecuada de la



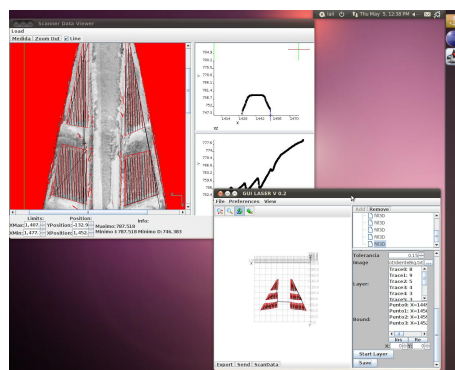
Se carga la nube de puntos para su uso



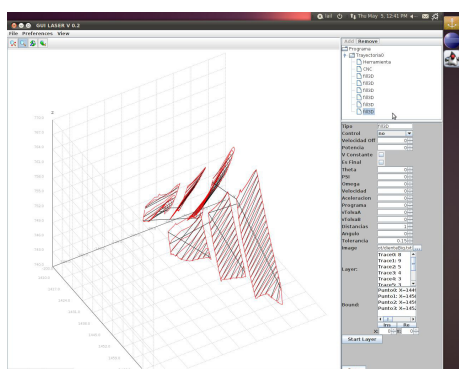
Selección de área y parámetros de relleno



Generación de trayectorias asociadas



Se repite en cada área a recubrir



Se realizan los desplazamientos



Se obtiene el recubrimiento

Figura 7.7: Ejemplo de caso que permite la obtención de superficie escaneada de diente de excavadora

herramienta, estableciéndose en este caso en $0,5mm$, y es obtenido con polinomios de grado 21. Con la aproximación polinómica es posible interpolar las posiciones y las derivadas de cualquier punto de la curva lo que permite obtener las tangentes en cada punto.

Para obtener las normales a la superficie, que hacen posible el cálculo necesario para orientar la herramienta, se utiliza la nube de puntos que nos permite para un punto de la superficie obtener las intersecciones de esta con los planos $X = cte$ e $Y = cte$. Con los puntos de cada plano es posible obtener, mediante otra interpolación polinómica, las derivadas de dichas intersecciones y a partir de ellas obtener el vector unitario normal a la superficie, \hat{n} . Esto puede hacerse en cualquier punto de la superficie y en particular en los seleccionados de la zona de color blanco. De esta forma se obtiene para cada punto de la marca el vector unitario tangente \hat{T} , el vector unitario normal a la superficie \hat{n} y un tercer vector unitario obtenido con el producto de los dos anteriores, $\hat{u} = \hat{T} \times \hat{n}$. Este triédro se utilizará para definir la orientación del eje de la herramienta, que se expresará por medio de los ángulos esféricos θ y ψ . El ángulo que define el giro de la herramienta alrededor de su eje, φ , se utilizará para evitar que los ángulos que definen

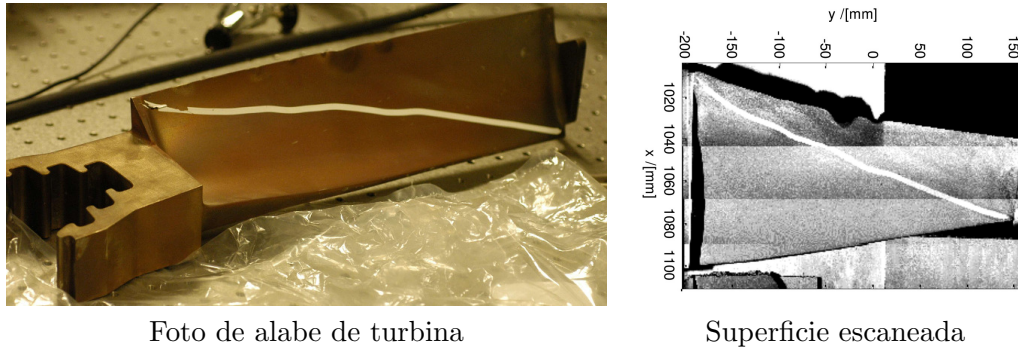


Foto de alabe de turbina

Superficie escaneada

Figura 7.8: Imágenes de la superficie del alabe tomado como ejemplo en que la línea blanca es el recorrido trazado sobre la superficie. Dicha línea se empleará para determinar la trayectoria de modo automático.

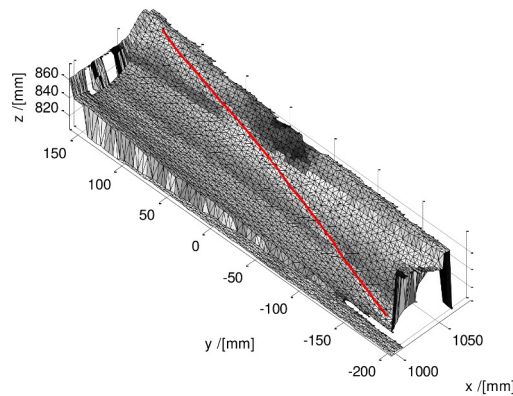


Figura 7.9: La superficie del alabe representada por medio de triángulos y la línea roja con los puntos de la superficie que marcan el recorrido para la herramienta.

la posición del robot se salgan de rango y para mantener la continuidad en los cuadrantes como explicaremos más adelante.

Para transformar esos puntos en una trayectoria del robot que pueda ser recorrida a velocidad constante, se obtiene a partir de la aproximación polinómica una sucesión de arcos que mantengan continua la derivada. Para ello debe cumplirse que la tangente inicial de un arco ha de coincidir con la tangente final del arco anterior. En este caso, por la tipología del proceso laser a llevar a cabo, el número de arcos a utilizar se determina imponiendo que la distancia entre los arcos y los puntos suavizados de la línea a recorrer cumpla que las desviaciones cuadráticas medias sean inferiores a $0,25mm$. Esto se consigue utilizando un total de 18 arcos de circunferencia.

Los arcos seleccionados se escribirán en un archivo con las órdenes del robot donde se incluyan además los datos que permiten definir la orientación de la herramienta respecto de la superficie. Así, los arcos se especificarán dando la posición del punto inicial, final y uno intermedio y la orientación por medio de un cuaternio. Para realizar este proceso, es necesario tomar los valores de la posición XYZ y el triedro $\{\hat{T}, \hat{n}, \hat{u}\}$ en cada uno de los puntos que definen los arcos de circunferencia que va a describir el robot y, aplicando la inclinación adecuada del eje de la herramienta, determinar los ángulos de los seis ejes del robot. En ese proceso de inversión se deben resolver las ambigüedades del robot eligiendo adecuadamente los cuadrantes de ciertos ejes (1, 4 y 6 para el IRBL2400) de forma que el movimiento pueda realizarse de forma continua en todos los ángulos. Para ello se calculan en cada paso los cambios de cuadrantes de los ejes con ambigüedades y se eligen los cuadrantes contiguos para que no existan saltos en los ángulos

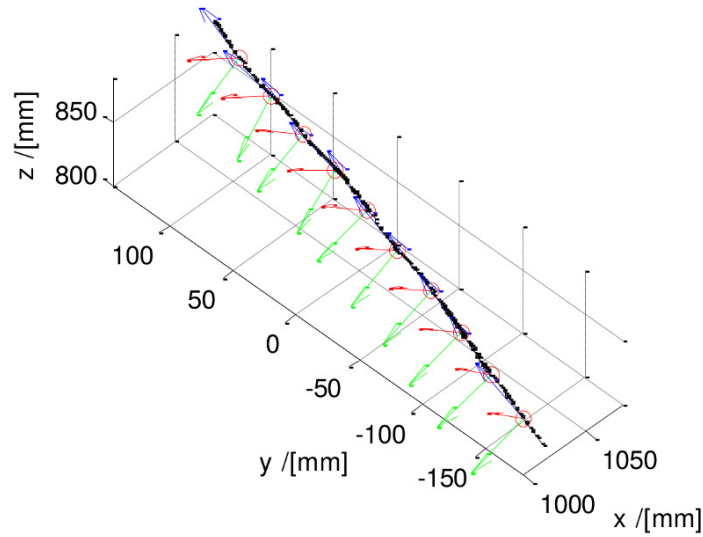


Figura 7.10: Muestra de vectores unitarios $\hat{\mathbf{T}}$ (azul), $\hat{\mathbf{n}}$ (rojo) y $\hat{\mathbf{u}}$ (verde) para algunos de los puntos de la curva del recorrido sobre la superficie.

y estos se mantengan dentro de los rangos de valores alcanzables por el robot.

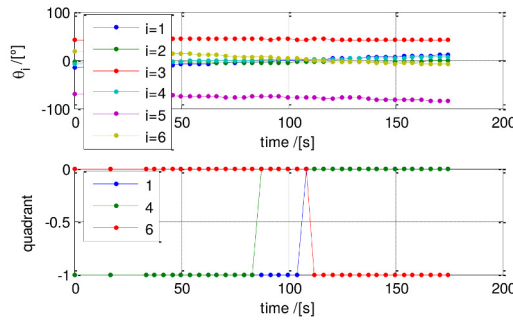


Figura 7.11: Los valores de los ángulos de los seis ejes del robot para el recorrido seleccionado sobre la superficie con una velocidad de 15mm/s . En la gráfica inferior se muestran los cambios de cuadrantes en los ejes 1, 4 y 6 una vez resueltas las ambigüedades para evitar saltos a cuadrantes no contiguos.

En la figura se muestran los valores de los ángulos de los seis ejes del robot y los cuadrantes de los ejes 1, 4 y 6 para el recorrido seleccionado sobre la pieza. Los cambios de cuadrantes se hacen siempre a un cuadrante contiguo y por ello los ángulos varían de forma continua y suave sin los saltos de 180 grados provocados por la elección inadecuada de los cuadrantes de los citados ejes.

Resueltas las ambigüedades ya se puede generar el código con las instrucciones del robot en el que se incluye la configuración completa del robot: posición de la herramienta, orientación de la herramienta y cuadrantes de los ejes con ambigüedades. Este proceso se realiza de forma automática y permite evitar muchos problemas de ejecución posterior en la generación del programa de robot. La distancia máxima entre la trayectoria definida por los arcos de circunferencia y las posiciones de los puntos seleccionados de la nube de puntos es de $1,2\text{mm}$ con una desviación cuadrática media de $0,3\text{mm}$. Debe tenerse en cuenta que una parte de esta discrepancia se debe en parte al ruido de los puntos obtenidos con el escáner.

También es posible realizar un análisis de las velocidades y de las aceleraciones obtenidas

de los ángulos por los que se estima que transcurrirá el recorrido del robot. El recorrido real siempre difiere del programado por la propia inercia del robot y su sistema de control. En la figura se muestran los valores de las velocidades angulares de los seis ejes del robot para el caso de que la trayectoria se recorra con velocidad constante de 15mm/s . Las gráficas muestran que las velocidades se mantienen en valores aceptables muy por debajo de los límites del robot (entre 150 deg/s y 300 deg/s).

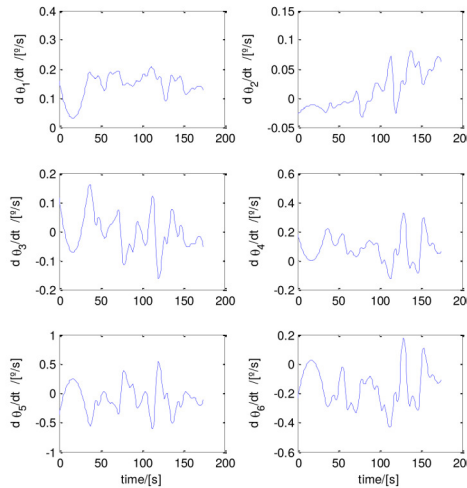


Figura 7.12: Los valores de las velocidades angulares de los seis ejes del robot para el recorrido seleccionado sobre la superficie con una velocidad de 15mm/s .

7.5. Ejemplos de fabricacion y tratamientos de superficie

Se han incluido diversos ejemplos, realizados a partir de la aplicacion de la metodologia descrita y el uso de la herramienta generada en combinacion con distintos sistemas de desplazamiento, para llevar a cabo tratamientos superficiales de recubrimiento y adiccion o extraccion de material. Dichos ejemplos constituyen una buena aproximacion a casos reales y han servido como prueba de concepto a la hora de comprobar si las funcionalidades que han permitido su realizacion cubren las necesidades de un proceso productivo industrial.

La mayor parte de los ejemplos se han obtenido mediante la tecnica del cladding, pero se ha incluido tambien la muestra de una pieza de micromecanizado, puesto que el procedimiento de obtencion es analogo, entendiendo que la herramienta extrae material en lugar de añadirlo.

La consecucion de un sistema completo que permita obtener este tipo de piezas de manera repetible y sencilla es la parte del presente trabajo que mayor importancia tiene, tanto a nivel practico como a nivel cientifico, puesto que gran parte de las tareas que es necesario llevar a cabo en el laboratorio se pueden realizar mas rapido, de modo mas controlado, con menos errores y, lo que es mas importante, de modo automatico y con mayor cantidad de datos para realizar analisis mas exhaustivos de los resultados, siendo factible para el investigador incluso el planificar una bateria de experimentos y, a medida que el sistema los va realizando, estudiar los resultados de los precedentes simultaneamente. Adicionalmente, como se ha mencionado, este tipo de procesos son de elevado interes industrial, siendo este el ambito en el que se estan desarrollando actualmente varios de los proyectos del LAIL y habiendose efectuado transferencia tecnologica de estos resultados a varias empresas del sector del metal, destacando el caso del ETNA ².

²Proyecto con titulo Fabricación aditiva por láser de componentes de alto valor añadido y codigo ITC20133038

Se ha dado difusión a los resultados (ver [30]) y se han publicado diversos artículos relacionados con esta tipología de procesos (ver [40] y [34])

7.5.1. Ejemplos de rellenos de polígonos

En los ejemplos que se muestran a continuación se observa el resultado de rellenar una forma poligonal con los distintos patrones descritos previamente.

En el polígono relleno mediante líneas se puede observar que se respeta el borde de la geometría razonablemente, aunque puede existir cierto exceso de material en las aristas y vértices coincidentes con la dirección de las líneas, concretamente en su punto de inicio y fin, y que la capa tiene un acabado homogéneo debido a que cada uno de los cordones depositados está a una distancia constante del anterior y posterior. En el caso mostrado se puede apreciar que la separación entre cordones no permite un solape completo de los mismos, lo cual podría originar problemas similares a los descritos en el ejemplo de fabricación de una pared vertical empleando el sistema de control, puesto que existe un surco intermedio entre líneas que debe ser rellenado por el nuevo material de aportación. Esto último es, en cualquier caso, algo que se puede solventar cambiando la distribución de líneas entre capas si fuese necesario su apilado, o bien, si el material lo permitiese, un proceso de refusión que suavizase la superficie. Otra característica derivada de emplear esta tipología es que, existe una direccionalidad clara preferente en la capa, hecho que puede ser problemático si forma parte de una pieza que estará sometida a esfuerzos en un eje no preferente. Es posible evitar dicha direccionalidad alterando la orientación de las líneas entre capas si estas se solapan.

En el polígono relleno mediante polígonos obtenidos por paralelas al contorno se puede observar que se respeta el borde de la geometría totalmente, constituyendo en los propios polígonos originales una parte de los cordones que se realizan. Cabe destacar que el acabado no es tan homogéneo como en el caso anterior, puesto que hay puntos de la capa, sobre todo los coincidentes con vértices de los polígonos de relleno, que no están a una distancia suficiente como para evitar solapes o tienen una separación excesiva, siendo esto debido a que se ha de mantener el criterio de distancia entre aristas. Debido a este problema, este procedimiento es, en general, menos recomendable salvo que los polígonos a rellenar tengan una forma que lo justifique o se pretenda evitar los problemas de direccionalidad.

Una alternativa posible es rellenar los polígonos mediante arcos pertenecientes a una espiral o serie de circunferencias concéntricas. En este caso puede existir cierto exceso de material en todas las aristas, ya que siempre estará contenido en ellas el principio o fin de un arco, aumentando en algunos casos el número de posibles defectos en relación al relleno con líneas. A cambio, el material no se depositará con direccionalidad. Esta solución, sin embargo, requiere el trazado de elementos tipo arco, que en general tendrán un límite asociado de velocidad máxima inferior al asociado a elementos tipo línea, al menos en algunos sistemas de desplazamiento. Vista la complejidad añadida, salvo que el caso lo justifique, no se recomienda el uso de este método. En la imagen se observa el resultado esperable al realizar un relleno de este tipo, en concreto, para una pieza cilíndrica, situación en la que sí sería adecuado emplearlo.

7.5.2. Ejemplos de recubrimientos

En los ejemplos que se muestran a continuación se observan dos casos particulares de recubrimiento de superficies, siendo el primero una pieza cilíndrica que emula un eje o vástago de válvula y el segundo una pieza con un hueco que requiere el uso de múltiples capas superpuestas debido a su profundidad. Otro buen ejemplo de recubrimiento de superficies es el diente de excavadora que ya se ha mostrado y mencionado a lo largo de este capítulo.

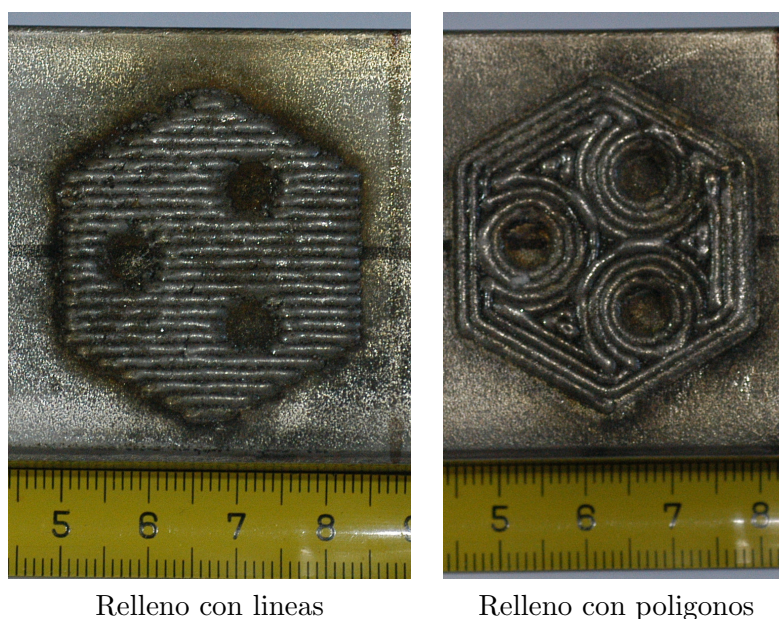


Figura 7.13: Ejemplo de distintas estrategias de relleno de poligono solido y forma de hexagono regular con tres agujeros circulares

En general, los tratamientos de recubrimiento se realizan para mejorar las propiedades mecánicas del material base en las condiciones operativas de los mismos, que dependerán de cada caso. Algunos ejemplos típicos son mayor resistencia al desgaste y la corrosión, capacidad de autolubricación o un mejor comportamiento frente a valores elevados o reducidos de temperatura, por cambio de coeficiente de conductividad térmica y dilatación.

El eje simulado muestra tres grupos de cordones, con distinto paso, realizados con parámetros diferentes y en todos los casos se observa que no existe una HAZ evidente debido al tratamiento, que el nivel de adhesión es bueno y que la distribución de material es homogénea a lo largo del área recubierta. Aun así es importante indicar que dichos cordones no son el resultado de un proceso de optimización, por lo que el nivel de calidad mostrado no es representativo del que es posible alcanzar con la técnica en sí, pero permite obtener una visión general de los resultados esperables para este tipo de geometrías. Se ha escogido este caso porque, debido a su forma cilíndrica, permite mostrar que el sistema tiene capacidad para tratar piezas de modo rotativo, aun en el caso de tener estas radios reducidos. El eje es además un caso típico de pieza que requiere tratamientos de recubrimiento en la industria, a fin de evitar emplear un material más caro o inadecuado en todo el cuerpo del mismo, pero que tiene requisitos especiales en las zonas de apoyo y de contacto con otros elementos como engranajes, ruedas o bielas.

La pieza con recubrimiento multicapa muestra la capacidad del sistema para rellenar zonas profundas, proceso típico en reparaciones, donde se sanea la zona afectada y se efectúa un recargue de material para recuperarla. Este proceso permite no solo aplicar el mismo material que existía originalmente, si no incluso modificar sus propiedades, empleando un nuevo elemento compatible o realizar un recubrimiento con gradiente de concentración, para hacer la zona más resistente a problemas posteriores. En el corte mostrado se observa que no existen poros ni discontinuidades, siendo el recubrimiento homogéneo y sin presencia de defectos apreciables. Como puede apreciarse, el método de relleno de esta pieza ha sido mediante circunferencias concéntricas por lo adecuado del mismo para recubrir el hueco.

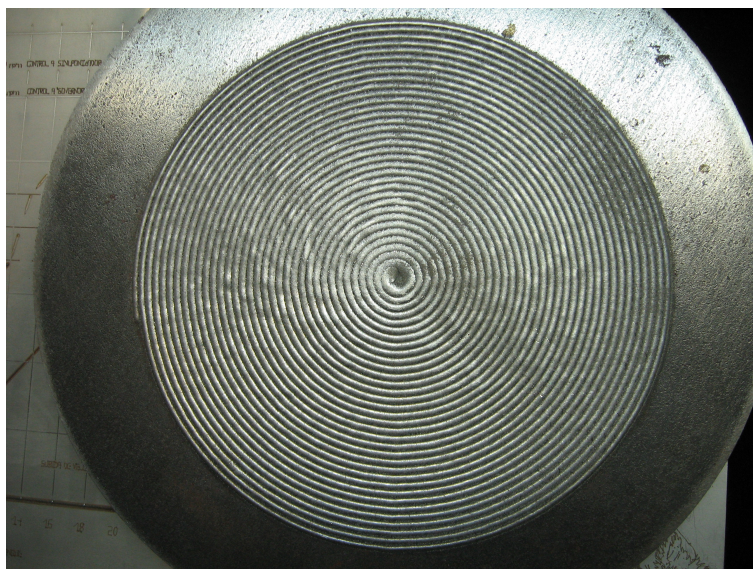


Figura 7.14: Ejemplo de alternativa de relleno basada en la generacion de una espiral (o serie de circunferencias concentricas) que sera cortada por los poligonos

7.5.3. Ejemplos de fabricacion

Estos ejemplos muestran una serie de piezas fabricadas exclusivamente mediante el uso de tecnologías de tratamiento por laser. Aunque se trata de casos de prueba y no responden a las necesidades de un proceso productivo, si es posible observar el alto grado de precision y nivel de acabado que es posible obtener, así como las posibilidades que ofrecen frente a las alternativas convencionales. El objetivo de su realizacion ha sido no solo demostrar que es factible usar este tipo de procesos para su obtencion, si no tambien mostrar sus limitaciones y la problematica asociada a los mismos.

El primer ejemplo es una pieza basada en la geometria empleada para mostrar los metodos de relleno, un hexagono con tres orificios circulares. Se ha obtenido del modo mas sencillo posible, esto es, elevando la herramienta y añadiendo capas de relleno mediante lineas unidireccionales iterativamente, sin alterar el patron ni los parametros del proceso, trabajando en lazo abierto, a fin de comprobar el impacto de los efectos observados en la zona del principio y fin de las lineas. Si bien es cierto que no se ha empleado una separacion entre cordones adecuada, ni se han optimizado los parametros para el proceso, como era de preveer en vista de los resultados previos, se observa que los laterales de la pieza presentan un acabado irregular debido al metodo de relleno empleado, aunque consistente en toda la altura de la misma. Esto, si la pieza necesitase un acabado liso, obligaria a sobredimensionarla y haria necesario un tratamiento posterior para fresar y eliminar el material sobrante, con las consiguientes perdidas derivadas.

El siguiente ejemplo es una pieza mas proxima a un caso real complejo, basada en un modelo de alabe sencillo con dos camaras interiores, que hace necesario el uso de curvas complejas, splines en este caso, tanto en el exterior como en el interior para describir la geometria. El objetivo ha sido demostrar que es posible, combinando los metodos de relleno mediante lineas y poligonos paralelos al contorno, obtener un acabado superficial que no requiera un mecanizado grueso y no presente un grado de irregularidad similar al visto en el caso previo, así como probar que las aproximaciones de curvas complejas permiten obtener resultados con una precision adecuada. Una vez mas, la geometria se ha obtenido del modo mas sencillo posible, esto es, elevando la herramienta y añadiendo capas de relleno combinadas de lineas y poligonos iterativamente, sin alterar el patron ni los parametros del proceso y trabajando en lazo abierto.



Figura 7.15: Ejemplo de eje recubierto con capas de material con distinta separacion entre cordones

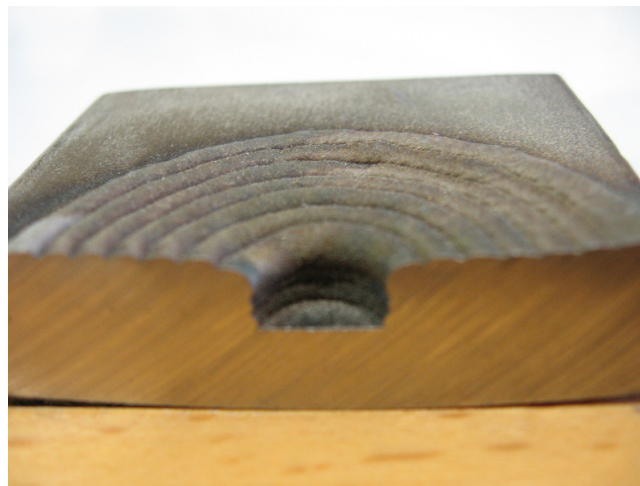


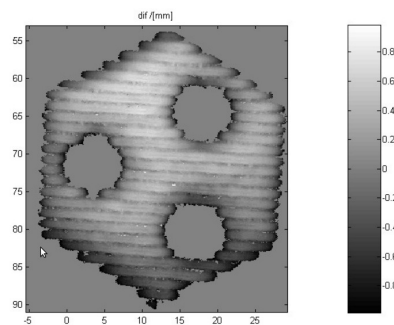
Figura 7.16: Ejemplo de corte de pieza con hueco tronco-conico con recubrimiento multicapa debido a la gran profundidad del mismo

Como ya se ha indicado, es posible obtener resultados con un aspecto y calidad superiores mediante la optimizacion del tratamiento para la pieza y material empleados.

El ejemplo siguiente muestra una de las posibilidades mas interesantes de la DMD, esto es, la inclusion de agujeros y diferentes materiales en diferentes partes de la pieza mientras esta se esta fabricando, incluso en su interior, pudiendo obtenerse resultados similares a los de moldeo o forjado, pero empleando materiales con propiedades mecanicas muy superiores. En el caso descrito, se ha fabricado la pieza dejando en su interior un hueco helicoidal, que seria complejo o imposible de mecanizar empleando maquina herramienta tradicional. En funcion de la tipologia del hueco, puede ser necesario inclinar la pieza durante su fabricacion para evitar que el material fundido lo ocluya durante su solidificacion, pero en el ejemplo descrito no ha sido necesario. El modelo tridimensional que se incluye al lado de la fotografia de la pieza no esta hecho a escala y se ha incorporado unicamente para facilitar la visualizacion del diseño. Tanto el acabado exterior como la separacion entre lineas de relleno no es representativo del acabado final de una pieza real, habiendose usado unos parametros que conducian a la obtencion de un resultado suficiente para validar la tecnica, en lo referente a introducir huecos durante el proceso de fabricacion, con coste y tiempo minimos.



Pieza fabricada usando cladding



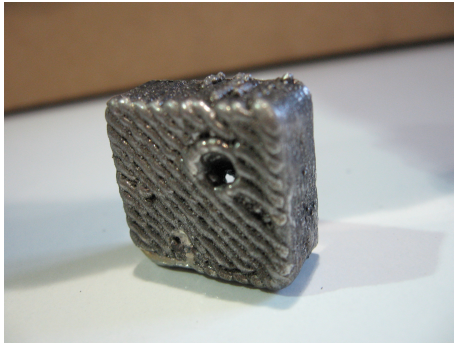
Medidas zona superficie

Figura 7.17: Ejemplo de pieza fabricada en base a la superposicion de capas de relleno mediante lineas unidireccionales.

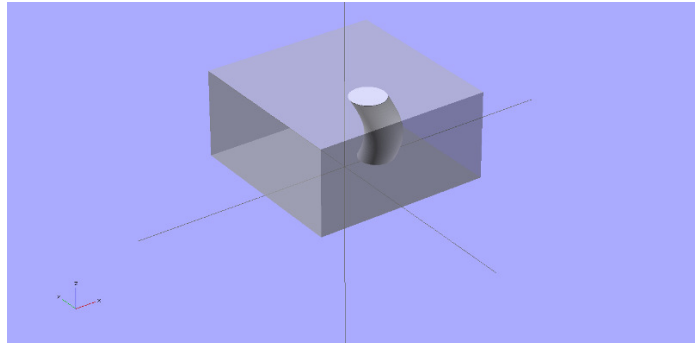


Figura 7.18: Ejemplo de pieza fabricada emulando geometria de alabe con uso de curvas complejas y relleno con lineas

Finalmente, se ha incluido un ejemplo de micromecanizado, a fin de mostrar que es factible realizar el proceso analogo a la adicion de material empleando la misma metodologia y herramienta de software, simplemente es necesario sustituir la herramienta de trabajo, en este caso un laser de nanosegundos, y sistema de desplazamiento, en este caso un conjunto de mesas de traslacion con precision micrometrica, para adaptarlos a la tecnica empleada. En este caso, el punto de partida es un bloque de material del que se va arrancando material para tallar la forma deseada. La pieza mostrada se ha mecanizado a partir de un material habitualmente dificil de trabajar con tecnicas convencionales como es el vidrio, a fin de demostrar que se trata de un proceso que tiene valor industrial y cientifico, tanto es asi, que en base al presente trabajo, se han realizado publicaciones referidas a los efectos y capacidades de tratamiento de la herramienta laser sobre este material, basadas en geometrias sencillas. La pieza mostrada simula un engranaje con dientes de 250 micras de ancho, se ha procesado con un tamaño relativo tan grande debido tanto a las limitaciones de focalizacion de la optica disponible, como para facilitar el analisis de los efectos que aparecen en los bordes de la pieza causados por la interaccion laser materia que da lugar al arranque de material.



Pieza fabricada usando cladding



Modelo conceptual 3D de pieza con agujero helicoidal

Figura 7.19: Ejemplo de pieza rectangular fabricada mediante superposicion de capas de relleno con lineas entrecruzadas y agujero helicoidal

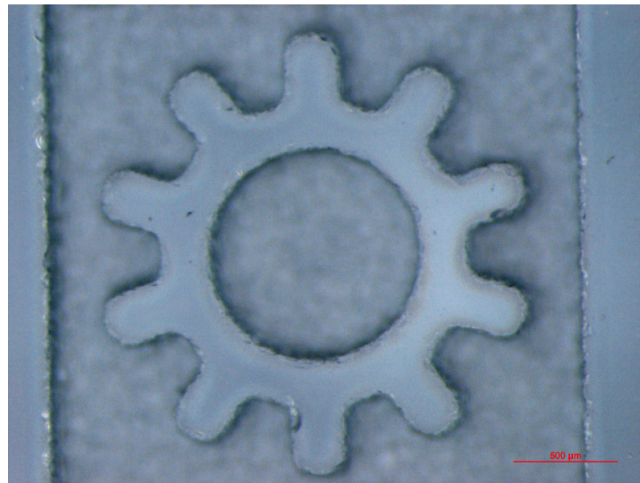


Figura 7.20: Ejemplo de resultado obtenido mediante arranque de material en vidrio para una geometria compleja que simula un engranaje

Capítulo 8

Conclusiones y líneas de trabajo futuras

A continuación se muestran los resultados, esto es, una revisión global de los objetivos del trabajo y el grado de éxito alcanzado, así como un breve resumen de las dificultades encontradas y/o las soluciones descritas. Posteriormente se detallan algunas posibles mejoras que sería deseable añadir al sistema, que a su vez permiten apuntar a las líneas de trabajo futuro.

8.1. Conclusiones

El objetivo principal del trabajo llevado a cabo, cuya base teórica se detalla en el presente documento, ha sido el desarrollo de un sistema que combina la integración y desarrollo del *hardware*, que permite la integración de todos los componentes y mejorar los resultados, y un *software* CAM, que ha sido creado para poder automatizar los tratamientos y procesos con herramientas láser teniendo en cuenta las particularidades de las mismas, basándose en FOSS y OSHW. Se detallan a continuación los resultados obtenidos en las distintas tareas realizadas para alcanzar este objetivo

- El objetivo se ha alcanzado de modo global, aplicándose la metodología y desarrollos realizados para obtener un sistema automatizado de láser cladding que permite la realización de distintos tipos de procesos. Si tomamos el sistema en su conjunto, podemos decir que es lo bastante flexible como para ser utilizado para otro tipo de tratamientos simplemente sustituyendo la herramienta utilizada, siempre y cuando los rangos de precisión y velocidad no difieran demasiado de los establecidos para el proceso actual. Si se pretende emplear esta aproximación para llevar a cabo otras técnicas y utilizar diferentes sistemas de desplazamiento, como estaba previsto, es necesario efectuar las pruebas necesarias para comprobar que el conjunto de algoritmos y los tiempos de respuesta de los equipos hechos a medida son adecuados, o si es necesario realizar ajustes o cambios.
- El uso de elementos *hardware* con SDK y/o *firmware* cerrado, sin capacidad multiplataforma o con especificaciones insuficientes ha sido un obstáculo importante a la hora de llevar a cabo su integración, a pesar del grado de flexibilidad del núcleo del sistema. Se ha promovido la sustitución de dichos elementos, en la medida de lo posible, a fin de evitar problemas de dependencia tecnológica futuros, como en el caso de la tarjeta de E/S. En muchos casos, por su especificidad, como en el caso de la cámara CMOS, no ha sido posible, y en dichos casos, esto se ha intentado paliar en la medida de lo posible, creando módulos independientes para su control y uso o *middleware*, interconectándolos a su vez con la aplicación general mediante protocolos de comunicación fácilmente utilizables con otros potenciales sistemas. Adicionalmente, la selección de nuevos elementos

para el sistema, una vez establecida la metodologia, se ha basado en los criterios previos de adecuacion tecnica y coste, pero añadiendo un criterio adicional de nivel de integrabilidad, en funcion de la posibilidad de comunicacion directa con el elemento y el nivel de documentacion de los comandos o tramas que permitan la configuracion o muestreo.

- Se ha diseñado y construido un conjunto de elementos *hardware* para controlar equipos auxiliares asociados al proceso y automatizar tareas que se realizaban de manera manual o semiautomática. Estos desarrollos se han llevado a cabo utilizando elementos discretos de bajo coste y fáciles de encontrar y sustituir, empleando cuando ha sido necesario como base una familia de microcontroladores con arquitectura abierta, documentada y con libre acceso tanto a las librerías como al código y a la herramienta de compilación que permite su programación, disponiéndose además de un IDE libre y abierto. El *firmware* necesario se ha desarrollado de forma escalable y adaptable, a fin de permitir modificaciones posteriores de modo sencillo. Los módulos diseñados disponen de E/S digitales, PWM para emular salidas analógicas, así como de entradas analógicas, y aunque no son elementos con tanta capacidad de procesamiento como un DSP, debido a la baja frecuencia de muestreo necesaria para monitorizar y controlar el tratamiento de *laser cladding*, pueden ser utilizados para ambas tareas. Tanto las entradas como las salidas han necesitado ser acondicionadas para adaptarlas a uso industrial.
- Se ha descrito e instalado un controlador PID para utilizar en *laser cladding*, empleando como señal de realimentación la salida del fotodiodo y actuando sobre la potencia de salida del *laser*. Se han empleado dos soluciones, en primera aproximación se ha usado la tarjeta NiDAQ para obtener los valores de señal y un PC convencional para ejecutar los cálculos, pero han surgido problemas derivados del uso simultáneo del PC para la realización de otras tareas, debido a problemas a la hora de poder forzar prioridades en el OS, para solventar este problema y reducir los costes, se ha modularizado el sistema de control, delegando las tareas de muestreo y cálculo en un sistema dedicado, en este caso un microcontrolador con entradas analógicas y un módulo DAC externo. En ambos casos, el sistema de control permite el muestreo de señales simultáneo y en el segundo caso, tiene la opción de gestionar el PID como adaptativo. El cálculo de los coeficientes proporcional, integral y derivativo ha demostrado ser complejo y se ha realizado de modo experimental mediante ajustes iterativos, tomando como base el método de ajuste de Ziegler-Nichols y no se ha realizado la optimización de dichos parámetros por ser dependientes del polvo y sustrato empleados. Se ha observado que no basta un PID básico para obtener resultados adecuados en todos los tratamientos.
- Se ha creado un software ¹ que permite el cálculo y generación automática de trayectorias tridimensionales, compuestas por múltiples tipos de elementos geométricos, utilizando la metodología y algoritmos descritos en este trabajo. Estas trayectorias han sido convertidas a comandos escritos en lenguaje RAPID, fin de poder realizarlas empleando un robot ABB y su sistema de desplazamiento externo. No se ha efectuado una búsqueda de camino óptimo a la hora de describir las trayectorias, ni se asegura que sean posibles, con igual precisión, para velocidades muy superiores a las empleadas a la hora de realizar procesos de *laser cladding* semejantes a los descritos. El precálculo de las trayectorias asegura su validez y la posibilidad de realizarlas a velocidad constante. La solución para evitar los problemas derivados de los límites de los ejes del robot son particulares y no se han generalizado, pudiendo producirse fallos no previstos o contemplados si no se

¹Solicitando un usuario y contraseña, puede obtenerse una copia del mismo en el SVN server <https://193.144.62.160/svn/nuntius3D>

realizan trayectorias en el espacio de trabajo habitual, aunque, en cualquier caso, tales fallos podrian ser subsanados una vez detectados y analizados.

- Se ha descrito un formato de almacenamiento de trayectorias, escrito en texto plano, en el que se incluyen tambien todos los procesos necesarios para llevar a cabo el tratamiento de laser cladding. Adicionalmente, es extensible a otros tipos de procesos, herramientas y sistemas de posicionamiento. Se ha diseñado de modo que sea sencillo de entender y permitiendo que sea posible su escritura mediante un simple procesador de textos.
- Se ha propuesto y probado un metodo para medir y obtener representaciones tridimensionales de superficies de piezas reales, basado en un la union de un conjunto de nubes de puntos, obtenidas a partir de los datos procedentes de un escaner laser bidimensional, con precision suficiente como para permitir el uso de dichos datos para realizar procesos de laser cladding, o bien otros procesos con requisitos similares. Se han planteado e implementado operaciones de correccion de puntos no validos. Se han planteado metodos alternativos para definir las superficies, pero no se han desarrollado en profundidad. Se ha descrito, pero no implementado, una metodologia para evitar la aparicion de huecos en la superficie debido a la presencia de sombras. Se ha obtenido una representacion cenital de la pieza en escala de grises.
- A partir de las nubes de puntos se pueden generar volúmenes tridimensionales editables y efectuar operaciones booleanas con otros volúmenes empleando el software antes mencionado. No se han utilizado metodos complejos para obtener los volúmenes, basandose en un proceso de triangulacion de Delaunay. Se ha propuesto un algoritmo para efectuar una serie de cortes del volumen o conjunto de volúmenes, de modo iterativo, mediante planos. Cada corte dara lugar a un conjunto de poligonos, que pueden rellenarse de distintas formas, convirtiendo posteriormente el relleno en trayectorias. En el caso del laser cladding, se puede llevar a cabo directamente empleando el software la fabricacion de piezas en base a modelo real o volumen escaneado, o añadir nuevos volúmenes a una pieza ya existente. Este algoritmo de corte es valido tambien para la extraccion de material y se ha comprobado llevando a cabo experimentos de micromecanizado laser.
- A partir de las nubes de puntos y la representacion cenital de la pieza, se pueden describir trazas o areas recubiertas por trazas, que se convertiran de modo automatico en trayectorias. Se ha empleado el algoritmo de Bresenham para determinar los puntos de la nube que forman parte de las trazas. Es posible establecer como condicion que a lo largo de los desplazamientos se mantenga la herramienta perpendicular a la superficie en todo momento. Se ha descrito un algoritmo de simplificacion que permite reducir el tamaño de las trazas.
- Se han realizado diversos experimentos que han permitido validar los algoritmos descritos y el software desarrollado. Se ha comprobado que la metodologia es correcta y valida para procesos de laser cladding.

8.2. Líneas de trabajo futuro

A continuacion se muestran algunas de las modificaciones o añadidos que permitirian mejorar las capacidades del sistema.

1. Uso de otros sistemas de control: Se ha comprobado que el uso de un PID basico permite aumentar la calidad de las piezas tratadas, pero es necesario realizar procesos de ajuste de manera experimental para cada conjunto de sustrato, polvo y ancho de cordón, existiendo

ademas transitorios que deben ser tratados de modo independiente.

Es posible en este caso plantear el uso de otros sistemas de control basados en procedimientos mas complejos, integrando en ellos nuevas señales de realimentacion, como la informacion de la camara CMOS y el pirometro, con el objetivo de reducir el nivel de ajuste experimental necesario para su calibracion y tener en cuenta los transitorios. Algunas alternativas que se barajan son el uso de filtros de Kalman, extendidos si fuese necesario, en combinacion con un sistema de control de logica difusa o redes neuronales, ya que estos no requieren un conocimiento del modelo del sistema para poder calcular los coeficientes del mismo.

2. Uso de otras variables manipuladas en el sistema de control: Actualmente, como se ha indicado, por sencillez y grado de efecto, el sistema de control actua modificando el valor de una unica variable manipulada, la potencia del laser.

En lugar de actuar unicamente sobre dicha potencia del laser, es factible, con un OS del robot actualizado, variar dinamicamente la velocidad de desplazamiento y distancia relativa a la pieza de la herramienta. Idealmente, seria posible diseñar un sistema de control que, en base a las señales obtenidas por los sensores, alterase el valor de potencia, velocidad y distancia.

3. Pruebas de analisis tipo STREAK en las imagenes de la camara CMOS y uso de iluminacion externa combinada con filtros para eliminar luz del proceso: El objetivo es obtener mas informacion de la camara, reduciendo el ruido y permitiendo visualizar y medir cambios en el cordón.

Una posibilidad es emplear la tecnica STREAK, que permite observar los cambios que se producen en una linea entre fotogramas, permitiendo un analisis en base temporal de la evolucion del proceso, o detectar irregularidades.

4. Modificacion *hardware* para permitir la realizacion de los procesos de E/S de todo el equipamiento disponible a traves de conexion ethernet: Permite que todos los elementos se puedan controlar desde multiples ubicaciones, que no sean dependientes de un unico maestro y que sea posible establecer una estructura de comunicacion general con el *software* CAM, empleando sockets.

En algunos casos, debido a las características de los equipos, puede resultar imposible utilizar este tipo de comunicacion, sobre todo si el volumen de envio de datos es elevado o es necesaria una velocidad muy elevada.

5. Resolucion de problema general de calculo de cuadrantes del robot: La secuencia de cuadrantes del robot condiciona la posible continuidad de una trayectoria, especialmente si esta es de gran longitud. Actualmente se emplea un conjunto de soluciones particulares, que se ha probado para cierto tipo de movimientos y que funcionan correctamente para el modelo de robot descrito.

A fin de poder utilizar de modo general el *software* CAM, seria mas adecuado, a fin de evitar pruebas y posibles modificaciones para adaptar nuevos robots, buscar una solucion generalizada, aunque esta tenga restricciones muy estrictas.

6. Proceso de precalculo de limites y uso de volúmenes virtuales de trabajo para evitar choques: Aunque el uso de volúmenes virtuales es una opcion que contemplan multiples robots en el mercado, rara vez tienen en cuenta la trayectoria que va a realizarse, limitandose a detener el sistema cuando el robot o la herramienta abandona o penetra en dichos volúmenes virtuales, en funcion de su tipo.

El objetivo seria, en base a una serie de volúmenes definidos en el espacio, comprobar

antes de realizar el proceso, que el TCP describe la trayectoria valida sin que salga o entre, segun el caso, en dichos volúmenes. En caso de que la trayectoria no fuese realizable, el sistema debería advertir de la situación e indicar la parte de la trayectoria donde se produce el problema

Adicionalmente, sería necesario efectuar una simulación dinámica de sólidos presentes, entre ellos el robot, la herramienta y la pieza a tratar, y comprobar que no se produce ningún tipo de colisión entre ellos (por ejemplo empleando ODE). Esta aproximación tiene limitaciones si no es posible mantener relativamente estático el entorno de trabajo, puesto que si apareciesen sólidos no descritos originalmente en el proceso de precalculo podrían producirse choques. Una alternativa para paliar este problema es el uso de herramientas de visión artificial para determinar, al menos de modo aproximado, si se han producido cambios y la posición y forma de los nuevos volúmenes descritos.

7. Uso de sistema de fotografía convencional o estereofotografía junto con técnicas de luz estructurada para búsqueda de límites físicos del sistema: Actualmente, el proceso de escaneo de superficies se realiza de modo semiautomático, teniendo que introducir los límites el propio usuario.

El objetivo sería determinar los límites físicos en el sistema de referencia absoluto del sistema de traslación, con un grado de precisión razonable, pero menor que la necesaria para la realización del tratamiento, de la pieza situada en un área de tamaño y posición definidas. Una vez obtenidos los límites, será posible generar una serie de trayectorias sucesivas que permitan realizar un escaneo de precisión de toda o parte de la superficie de la pieza de modo automático y sin intervención por parte del usuario.

8. Uso del sistema posicionador de 2 ejes para realizar el escaneado de zonas con sombras: Como se ha indicado, en el momento de realizar un escaneo de una pieza, pueden aparecer sombras debido a la propia geometría de la misma, que tendrán como resultado zonas completas de puntos no válidos en la nube de puntos.

A fin de evitar todas o parte de las sombras, se han postulado una serie de procesos en el presente trabajo que permiten su eliminación. Para llevar a cabo algunos de dichos procesos es necesario desplazar la pieza. Esta operación es realizable empleando el posicionador de 2 ejes. Se requiere el cálculo de las zonas de sombras, determinar su posible origen, el ángulo de inclinación necesario para intentar corregirlas, el reposicionamiento de la pieza con dicho ángulo, la generación de la nueva trayectoria para recorrer el área anteriormente cubierta por las sombras y la conversión de los datos de la nube de puntos para recolocarla en las coordenadas asociadas a la posición original de la pieza.

9. Uso del sistema posicionador de 2 ejes para desplazar la pieza durante el tratamiento de modo dinámico: Actualmente el sistema posicionador de 2 ejes permite desplazamientos independientes de los dos ejes, que se llevan a cabo mientras el tratamiento no se está llevando a cabo, de modo que permiten reubicar la pieza en cualquier momento, pero no desplazarla mientras la herramienta también se desplaza y está efectuándose el procesamiento de la superficie.

El desplazamiento condicionado del posicionador es factible desde el punto de vista técnico, aunque con ciertas limitaciones. Es necesario llevar a cabo los cálculos necesarios para comprobar como puede favorecer a una trayectoria determinada desplazar la pieza mientras se lleva a cabo, efectuando los cambios de velocidad necesarios, así como de inclinación y posición de la herramienta, para combinar los dos movimientos. A priori, permitiría flexibilizar el sistema porque reduce, en cierta medida, las limitaciones físicas del robot, puesto que permite alcanzar zonas de la pieza que serían inaccesibles de otro modo, pero a cambio añade un grado de complejidad importante a la generación de

trayectorias, una tarea ya de por si complicada.

10. Uso de metodologia para mejorar el solape y representacion de las nubes de puntos: Aunque la precision obtenida con el sistema actual es suficiente para la tecnica estudiada, el estudio de alternativas que permitan alcanzar una precision mayor puede ser necesario si se pretenden llevar a cabo otros procesos laser que la requieran.
Se plantean como alternativas el uso de tecnicas de solape apoyadas en tecnicas de regresion local o LOWESS, la conversion de la nube de puntos a curvas NURBS y el uso de librerias especificas para su tratamiento.
11. Uso de algoritmo optimizado Delaunay para obtencion de mallas: Actualmente el proceso de mallado de la nube de puntos se realiza mediante el uso de una libreria que emplea un algoritmo de Delaunay para dos dimensiones, lo cual es suboptimo.
Se plantea como alternativa la implementacion y uso de un algoritmo mas adecuado para el caso tridimensional, que ademas suponga un menor coste computacional y sea mas rapido.
12. Soporte otros formatos 3D que permitan el uso de primitivas complejas (STEP y/o IGES): Actualmente el sistema es capaz de leer y escribir ficheros en formato STL, que permite representar los volúmenes mediante conjuntos de triangulos.
El objetivo es poder emplear formatos con curvas y elementos geometricos mas exactos, a fin de mejorar el nivel de precision disponible en el modelo, empleando ademas menos espacio de almacenamiento. Las primitivas podran ser definidas por una formulacion matematica y apareceran siempre acompañadas de una serie de parametros numericos, por lo que sera posible obtener cualquier punto perteneciente al volumen sin necesidad de efectuar aproximaciones. Tanto el STEP como el IGES son formatos estandar bien documentados, ampliamente utilizados en programas de diseño tipo CAE/CAD, por lo que permitiria aumentar la compatibilidad del sistema.
13. Proceso de relleno de geometrias con curvas utilizando patrones lineas: En este momento, los cortes de los volúmenes, dado que estos estan formados por triangulos, dan lugar necesariamente a poligonos formados por lineas, pero en caso de poder describir el volumen como se indica en el punto anterior, es posible la obtencion de geometrias que contengan curvas.
Para rellenar este tipo de geometrias utilizando un patron de rectas, deben hallarse los punto de corte de dichas rectas con la geometria que actua como borde del area a recubrir. Cada tipo de curva tiene una ecuacion que la describe, por lo que el problema sera resoluble, en tanto en cuanto se llegue a cortar con la recta. En funcion de la tipologia de curva puede ser factible emplear la solucion simbolica de un polinomio de primer, segundo o tercer grado.
14. Aproximacion de puntos de poligonos a arcos: Como se ha indicado antes, debido al origen de los volúmenes, el corte de los mismos solo puede dar lugar a areas descritas por sucesiones de lineas.
El hecho de tener que realizar trayectorias a velocidad constante basadas en este tipo de geometrias, hace necesario la inclusion de elementos tipo arco entre las lineas, a fin de poder suavizar dichas trayectorias lo suficiente como para hacerlas posibles. En algunos de los casos particulares en que exista un conjunto de gran numero de lineas de pequeño tamaño sucesivas, sera factible sustituir dicho conjunto por un arco o conjunto de arcos, lo que permitira simplificar el numero de puntos de la trayectoria, haciendola a su vez mas facilmente realizable y, en condiciones ideales, minimizando el impacto que pueda tener

la aproximación en la precisión original. Existen varios algoritmos que permiten realizar este tipo de aproximaciones, pero todavía no se ha probado ninguno.

15. Corrección automática de trayectorias planificadas a partir de pasos previos: Cuando se efectúa un tratamiento, la superficie cambia debido al efecto de la herramienta, añadiendo el material en forma de cordón en el caso del *laser cladding*, o creando surcos en el caso del micromecanizado.

Si esta planificada una secuencia de trayectorias dependientes entre sí, en menor o mayor grado, y es posible medir los cambios producidos por las trayectorias previas a medida que se van ejecutando, se modificarán las trayectorias pendientes, antes de ser lanzadas, en función de las diferencias observadas con respecto al camino que debería recorrer y el que se podrá realizar realmente. Este desarrollo permitiría la fabricación aditiva, sin intervención humana, y con criterio de autocorrección.

16. Implementación de algoritmo de identificación de posición relativa de pieza a partir del modelo: Supongamos disponible el modelo de la pieza real que va a ser tratada, así como otro modelo análogo pero con modificaciones. Actualmente es necesario calcular los cortes de ambos modelos, efectuar las diferencias, rellenar según convenga y, una vez obtenidos dichos rellenos, estos se deberán medir y colocar en el espacio en función de la posición real de la pieza.

Es conveniente, debido a lo complejo de la operación final de transformación de coordenadas y la posible pérdida de precisión ocasionada, emplear la posición real de la pieza en el espacio. Sería posible añadir un proceso basado en la comprobación iterativa de la relación de distancias entre la superficie de la pieza real y el modelo, utilizando puntos de referencia para partir de una solución aproximada, tal que permita determinar cuando se alcanza el valor mínimo, lo que implicaría que se encuentra en la posición más próxima a la de la pieza real. Esto permitiría realizar de modo automático aquellos tratamientos que estén descritos para el modelo original, puesto que los cambios de coordenadas vendrían dados por el algoritmo y la generación de trayectorias ya podría ser con la transformación sobre la pieza real.

17. Uso de elementos curva para definir trazas de modo interactivo: Actualmente las trazas que se pueden marcar sobre las superficies solo pueden ser de tipo línea, por sencillez a la hora de efectuar los cortes y la versión implementada de algoritmo de Bresenham.

La posibilidad de introducir elementos de tipo curva para generar trazas pasa por emplear la versión extendida del algoritmo de Bresenham, o bien por efectuar la conversión de la nube de puntos a una superficie NURBS y proyectar sobre ella las trazas descritas.

18. Búsqueda de zonas de contraste para generación automática de trayectorias: Se ha probado en el ejemplo del alabe, pero no se ha implementado en el *software* final.

Si se ha marcado una zona con un color que sea fácilmente reconocible en la representación en escala de grises de la superficie, podría utilizarse para obtener la secuencia de puntos que formarían una trayectoria. Una vez obtenidos los puntos, en función de su distribución, pueden tratarse como una traza, como un conjunto de ellas o como una secuencia de puntos 3D libres. El procedimiento de detección de píxeles del color establecido se realizaría empleando un filtro de valores umbrales, recurriendo posteriormente a un ajuste para determinar las posiciones en las zonas en que hay una elevada concentración de píxeles del mismo color.

19. Visualización en tiempo real de desplazamientos reales del robot y almacenamiento de los mismos: Actualmente el sistema no dispone de capacidad de seguimiento, limitándose a mostrar por pantalla de modo estático las trayectorias que se realizarán.

Representar por pantalla las posiciones reales del sistema de desplazamiento en relacion a las previstas, permite observar si existen desviaciones importantes en el proceso. Tambien permitiria al usuario comprobar que la trayectoria se ajusta a lo previsto

20. Incluir modulos de generacion de trayectorias para nuevos sistemas de desplazamiento: Actualmente el sistema funciona con robots ABB y controladores de micromenizado tipo MM4006. Tambien dispone de un modulo en pruebas para generar comandos en g-code pero no se ha validado todavia.
Es conveniente incluir modulos adicionales de lenguajes para mejorar la capacidad de integracion del sistema. Lo mas sencillo es añadir nuevos lenguajes de robots, sobre todo para modelos cuyo funcionamiento no difiera demasiado del equipo empleado en el caso de ejemplo.
21. Cambios lenguaje de programacion, librerias de visualizacion y mejora de capacidad multiplataforma: Actualmente el sistema funciona en Java en un PC convencional.
Se plantea aqui el uso de Python como lenguaje principal alternativo, por dar lugar a un codigo mas breve y facil de mantener, asi como por la disponibilidad de multiples librerias para gestion de graficos OpenGL en 3D, 2D. Este lenguaje es multiplataforma, absolutamente libre, y puede funcionar en la mayoria de OS y arquitecturas, incluso en algunos donde no existe maquina virtual de Java.
22. Combinacion de formato de almacenamiento de trayectorias en XML con formato vectorial de representacion SVG: Actualmente el sistema almacena los datos de trayectoria y proceso en texto plano y es necesaria la aplicacion para su visualizacion tridimensional. Una posibilidad que aumentaria la flexibilidad del formato de almacenamiento seria la generacion paralela de una representacion tridimensional animada en SVG de la trayectoria descrita, incluyendo, si fuese posible, los cambios en cada punto. Dicha representacion seria visible a traves de cualquier navegador convencional, por lo que permitiria obtener informacion de modo sencillo al usuario sin disponer de herramientas especificas y/o complejas.

Bibliografía

- [1] *Especificaciones del producto IRB 2400.*
- [2] IRBP A especificación.pdf.
- [3] A. Yáñez A. Ramil, J. Lamas. Automatic 3d path generation for laser cladding robotized system from laser line scan point cloud. In *10 Congreso Interamericano de Computación Aplicada a la Industria de Procesos: CAIP 2011*, 2011.
- [4] J.C. Alvarez. *Desarrollo e instrumentación de un sistema exportable de monitorización y control en tiempo real de procesos de tratamiento térmico superficial de aceros con láser.* PhD thesis.
- [5] J.M. Amado, J. Montero, M.J. Tobar, and A. Yáñez. Ni-based metal matrix composite functionally graded coatings. *Physics Procedia*, 39:362 – 367, 2012. Laser Assisted Net shape Engineering 7 (LANE 2012).
- [6] Guijun Bi, Andres Gasser, Konrad Wissenbach, Alexander Drenker, and Reinhart Poprawe. Characterization of the process control for the direct laser metallic powder deposition. *Surface and Coatings Technology*, 201(6):2676 – 2683, 2006.
- [7] C. De Boor. *A practical guide to splines.* Springer-Verlag, New York, 1978.
- [8] J.E. Bresenham. Algorithm for computer control of a digital plotter. *IBM Systems Journal*, 4(1):25–30, 1965.
- [9] K.L. Chui, W.K. Chiu, and K.M. Yu. Direct 5-axis tool-path generation from point cloud input using 3d biarc fitting. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24(2):270 – 286, 2008.
- [10] P Cignoni, C Montani, and R Scopigno. Dwall: A fast divide and conquer delaunay triangulation algorithm in ed. *Computer-Aided Design*, 30(5):333 – 341, 1998.
- [11] B. Delaunay. Sur la sphere vide. a la mémoire de georges voronoi. *Bulletin of Academy of Sciences of the USSR*, (7):793–800, 1934.
- [12] Jacques Denavit and Richard Scheunemann Hartenberg. A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices. *Trans ASME J. Appl. Mech.*, 23:215–221, 1955.
- [13] Wim Devesse, Dieter De Baere, and Patrick Guillaume. Design of a model-based controller with temperature feedback for laser cladding. *Physics Procedia*, 56:211 – 219, 2014. 8th International Conference on Laser Assisted Net Shape Engineering {LANE} 2014.
- [14] T. Dietz, A. Pott, and A. Verl. Practice for planning and realization of advanced industrial robot systems. In *Robotics (ISR), 2013 44th International Symposium on*, pages 1–4, Oct 2013.

- [15] Thomas Dietz, Ulrich Schneider, Marc Barho, Susanne Oberer-Treitz, Manuel Drust, Rebecca Hollmann, and Martin Haegele. Programming system for efficient use of industrial robots for deburring in sme environments. In *Robotics; Proceedings of ROBOTIK 2012; 7th German Conference on*, pages 1–6, May 2012.
- [16] Alireza Fathi, Amir Khajepour, Ehsan Toyserkani, and Mohammad Durali. Clad height control in laser solid freeform fabrication using a feedforward pid controller. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 35(3-4):280–292, 2007.
- [17] F. Liou H. Pan. Numerical simulation of metallic powder flow in a coaxial nozzle for the laser aided deposition process. *Journal of Materials Processing Technology*, 168:230–244, 2005.
- [18] Richard Scheunemann Hartenberg and Jacques Denavit. *Kinematic synthesis of linkages*. McGraw-Hill.
- [19] Almir Heralić, Anna-Karin Christiansson, and Bengt Lennartson. Height control of laser metal-wire deposition based on iterative learning control and 3d scanning. *Optics and Lasers in Engineering*, 50(9):1230 – 1241, 2012.
- [20] Almir Heralić, Anna-Karin Christiansson, Mattias Ottosson, and Bengt Lennartson. Increased stability in laser metal wire deposition through feedback from optical measurements. *Optics and Lasers in Engineering*, 48(4):478 – 485, 2010.
- [21] J. D. Hobby. Smooth, easy to compute interpolating splines. *Discrete and Computational Geometry*, 1:123–140, 1986.
- [22] J.Th.M. De Hosson I. Hemmati, V. Ocelík. The effect of cladding speed on phase constitution and properties of aisi 431 stainless steel laser deposited coatings. *Surface & Coatings Technology*, 205:5235–5239, 2011.
- [23] J. Lamas A. Ramil M. J. Tobar A. Yáñez J. C. Álvarez, J. M. Amado. Monitoring and control of the laser cladding process with different sensors. In *Proceedings of the LANE 2007; Laser Assisted Net Shape Engineering 5*, pages 749–760, 2007.
- [24] J. Lamas A. Ramil M. J. Tobar A. Yáñez J. C. Álvarez, J. M. Amado. Study of the dependency among geometrical and thermal information from the melt pool in laser surface treatments. In *Proceedings of the Fourth International WLT-Conference on Laser in Manufacturing 2007*, pages 381–385, June 2007.
- [25] B-C. Hwang J.Lin. Coaxial laser cladding on an inclined substrate. *Optics & Laser Technology*, 31:571–578, 1999.
- [26] R. Stromeyer A Gasser K W A. Weishiet, G. Backes. *Powder Injection: The Key to Reconditioning and Generating Components Using Laser Cladding*. PhD thesis.
- [27] J.A.P. Kjellander and Mohamed Rahayem. Planar segmentation of data from a laser profile scanner mounted on an industrial robot. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 45(1-2):181–190, 2009.
- [28] A.; Yáñez A. Lamas, J.; Ramil. Smoothing and simplification algorithm for computer aided manufacturing paths with complex curves. In *Proceedings of the 4th IFAC Workshop on Discrete-Event System Design 2009*, pages 61–65, October 2009.

- [29] J. Lamas. Desarrollo de un software en código abierto para la ayuda del mecanizado (corte y marcado) de materiales con láser. Master's thesis, EPS Ferrol, Spain, 2006.
- [30] J. Lamas. Fast generation of 3d paths for laser cladding repair using a 6 dof robot. In *Proceedings of the AIMEN VIII Workshop on Materials Processing with Laser Technology 2011*, 2011.
- [31] J. Lamas. Analysis of hybrid laser welding experiments. Master's thesis, Lulea University of Technology, Sweden, 2014.
- [32] Javier Lamas, Jan Frostevarg, and Alexander F.H. Kaplan. Gap bridging for two modes of laser arc hybrid welding. *Journal of Materials Processing Technology*, 224:73 – 79, 2015.
- [33] Javier Lamas, Jan Erik Karlsson, Peter Norman, John Powell, Alexander Kaplan, and Armando Yáñez. The effect of fit-up geometry on melt flow and weld quality in laser hybrid welding. *Journal of Laser Applications*, 25(3), 2013.
- [34] A.J. López, T. Rivas, J. Lamas, A. Ramil, and A. Yáñez. Optimisation of laser removal of biological crusts in granites. *Applied Physics A*, 100(3):733–739, 2010.
- [35] L. Maisonob. Drawing an elliptical arc using polylines, quadratic or cubic bezier curves. *spaceroots.org*, 2003.
- [36] Philip McCord Morse and Herman Feshbach. *Methods of Theoretical Physics*, volume Part I. McGraw-Hill.
- [37] Mir Abolfazl Mostafavi, Christopher Gold, and Maciej Dakowicz. Delete and insert operations in voronoi/delaunay methods and applications. *Comput. Geosci.*, 29(4):523–530, May 2003.
- [38] F. Pini, F. Leali, and M. Ansaloni. Offline workpiece calibration method for robotic reconfigurable machining platform. In *Emerging Technology and Factory Automation (ETFA), 2014 IEEE*, pages 1–8, Sept 2014.
- [39] John Powell, J. Lamas, Jan Karlsson, Peter Norman, Alexander Kaplan, and A. Yáñez. The sensitivity of hybrid laser welding to variations in workpiece position. *Physics Procedia*, 12(1):188–193, 2011.
- [40] A. Ramil, J. Lamas, J.C. Álvarez, A.J. López, E. Saavedra, and A. Yáñez. Micromachining of glass by the third harmonic of nanosecond nd:yvo4 laser. *Applied Surface Science*, 255(10):5557 – 5560, 2009. Laser and Plasma in Micro- and Nano-Scale Materials Processing and Diagnostics Proceedings from the European Material Research Society Spring Meeting 2008 – Symposium B.
- [41] A. Riskus. Approximation of a cubic bezier curve by circular arcs and vice versa. *Information Technology and Control*, 35:371–378, 2006.
- [42] D. Salehi and M. Brandt. Melt pool temperature control using labview in nd:yag laser blown powder cladding process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 29(3-4):273–278, 2006.
- [43] P.M. Sammons, D.A. Bristow, and R.G. Landers. Iterative learning control of bead morphology in laser metal deposition processes. In *American Control Conference (ACC), 2013*, pages 5942–5947, June 2013.

- [44] W. Steen, K.G. Watkins, and J. Mazumder. *Laser Material Processing*. Springer London, 2010.
- [45] M. J. Tobar, J. M. Amado, J. Lamas, and A. Yáñez. Effect of processing parameters in manufacturing of 3d parts through laser direct metal deposition. In Srichand Hinduja and Lin Li, editors, *Proceedings of the 36th International MATADOR Conference*, pages 451–454. Springer London, 2010.
- [46] X. Lin W. Huang J. Li Y. Zhou Y. Li, H. Yang. The influences of processing parameters on forming characterizations during laser rapid forming. *Materials Science and Engineering A*, 360:18–25, 2003.

Apéndice A

Anexo

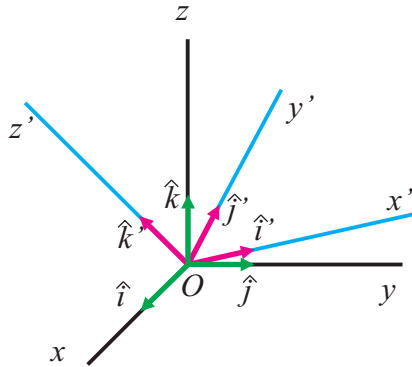
A.1. Rotacion de sistemas de referencia

Se describe a continuacion el aparato matematico que permite llevar a cabo una parte de las operaciones de transformacion que permiten referenciar puntos de un sistema de coordenadas en otro. Estas operaciones son necesarias, entre otras cosas, para poder describir la posicion del TCP en el sistema de referencia absoluto del desplazador.

A.1.1. Cambio de referencia ortonormal.

Consideraremos un sistema de referencia $Oxyz$ con una base ortonormal orientada a derechas $\{\hat{\mathbf{i}}, \hat{\mathbf{j}}, \hat{\mathbf{k}}\}$.

Si mediante una rotación cambiamos la orientación de los ejes y llamamos $Ox'y'z'$ y $\{\hat{\mathbf{i}}', \hat{\mathbf{j}}', \hat{\mathbf{k}}'\}$ al nuevo sistema y a la nueva base.



La relación entre las componentes de un vector cualquiera $\vec{\mathbf{v}}$ en los dos sistemas:

$$\vec{\mathbf{v}} = \sum_{\ell=1}^3 v_{\ell} \hat{\mathbf{e}} = \sum_{\ell} v'_{\ell} \hat{\mathbf{e}}'$$

vendrá dada por la proyección de los vectores $\hat{\mathbf{e}}'$ en la base $\hat{\mathbf{e}}$:

$$\hat{\mathbf{e}}' = \underbrace{(\hat{\mathbf{e}}' \cdot \hat{\mathbf{i}})}_{a_{\ell 1}} \hat{\mathbf{i}} + \underbrace{(\hat{\mathbf{e}}' \cdot \hat{\mathbf{j}})}_{a_{\ell 2}} \hat{\mathbf{j}} + \underbrace{(\hat{\mathbf{e}}' \cdot \hat{\mathbf{k}})}_{a_{\ell 3}} \hat{\mathbf{k}} = \sum_{m=1}^3 a_{\ell m} \hat{\mathbf{e}}$$

que expresadas en forma matricial toman la forma:

$$\begin{pmatrix} \hat{\mathbf{i}}' \\ \hat{\mathbf{j}}' \\ \hat{\mathbf{k}}' \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}}_R \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{i}} \\ \hat{\mathbf{j}} \\ \hat{\mathbf{k}} \end{pmatrix}$$

donde R es la *matriz de transformación*.

Para un vector $\vec{\mathbf{v}}$ cualquiera, $v'_\ell = \vec{\mathbf{v}} \cdot \hat{\mathbf{e}}'_\ell = v_1 a_{\ell 1} + v_2 a_{\ell 2} + v_3 a_{\ell 3}$,

$$v'_\ell = \sum_{m=1}^3 a_{\ell m} v_m$$

O bien,

$$\begin{pmatrix} v'_x \\ v'_y \\ v'_z \end{pmatrix} = R \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} \quad (\text{A.1})$$

que es la relación buscada.

La matriz de rotación tiene las siguientes propiedades:

- Es *ortogonal*, $RR^t = R^t R = \mathbb{I}$, por lo que la inversa coincide con la traspuesta $R^{-1} = R^t$.
- Su determinante es 1, $|R| = +1$.

Cuando existen varios sistemas de referencia lo habitual es numerarlo de forma correlativa para poder identificarlos fácilmente. Si en este caso llamamos sistema 0 al $Oxyz$ y sistema 1 al $Ox'y'z'$, entonces la ecuación A.1 podría expresarse como, $\vec{\mathbf{v}}_1 = R_{10}\vec{\mathbf{v}}_0$, es decir,

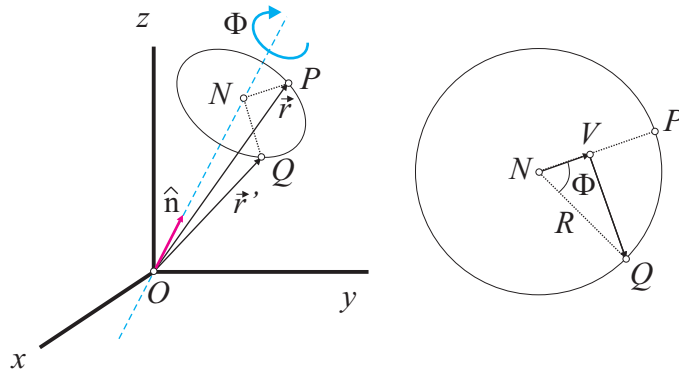
$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix}_1 = R_{10} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix}_0$$

que tomando la traspuesta se transforma en

$$(v_x \ v_y \ v_z)_1 = (v_x \ v_y \ v_z)_0 R_{01}$$

A.1.2. Forma matricial de una rotación

La matriz de rotación de ángulo Φ alrededor de un eje que pasa por el origen y es paralelo al vector unitario $\hat{\mathbf{n}}$ puede obtenerse aplicando la rotación en sentido opuesto a un vector genérico $\vec{\mathbf{r}}$ de coordenadas (x, y, z) . Así, si la rotación de los ejes es en sentido antihorario, aplicamos la misma rotación al vector $\vec{\mathbf{r}}$ pero en sentido horario para pasar del vector $\vec{\mathbf{r}} = \vec{\mathbf{OP}}$ al vector $\vec{\mathbf{r}}' = \vec{\mathbf{OQ}}$.



Podemos descomponer el vector \vec{OQ} en la siguiente manera:

$$\vec{OQ} = \vec{ON} + \vec{NV} + \vec{VQ}$$

de donde se obtiene

$$\vec{r}' = (\vec{r} \cdot \hat{n}) \hat{n} + [\vec{r} - (\vec{r} \cdot \hat{n}) \hat{n}] \cos \Phi + (\vec{r} \times \hat{n}) \sin \Phi$$

y reagrupando:

$$\vec{r}' = \cos \Phi \vec{r} + (\vec{r} \cdot \hat{n}) \hat{n} (1 - \cos \Phi) + (\vec{r} \times \hat{n}) \sin \Phi$$

que se conoce por *fórmula de rotación*.

La relación entre las componentes de \vec{r}' y \vec{r} es la matriz de rotación buscada,

$$R(\Phi, \hat{n}) = \cos \Phi \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} + (1 - \cos \Phi) \begin{pmatrix} n_x^2 & n_x n_y & n_x n_z \\ n_x n_y & n_y^2 & n_y n_z \\ n_x n_z & n_y n_z & n_z^2 \end{pmatrix} + \sin \Phi \begin{pmatrix} 0 & n_z & -n_y \\ -n_z & 0 & n_x \\ n_y & -n_x & 0 \end{pmatrix}$$

A partir de esta expresión es fácil demostrar las siguientes propiedades de la matriz de rotación:

- La traza está relacionada con el ángulo girado Φ ,

$$\text{traza}(R) = \sum_{\ell=1}^3 a_{\ell\ell} = 1 + 2 \cos \Phi$$

y se cumple, $1 \leq \text{traza}(R) \leq 3$

- El vector unitario \hat{n} según el eje de giro es autovector de R con autovalor $+1$,

$$R \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix} = 1 \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix}$$

A.2. Angulos y rotaciones de Euler.

Los ángulos de Euler permiten expresar la orientación de un sólido rígido respecto de un sistema de referencia. Las derivadas de estos ángulos nos dan la velocidad con la que cambia la orientación respecto del tiempo y por tanto permiten determinar la rotación del sólido. En el caso descrito, al igual que en el general, dicho angulos pueden describir facilmente la orientacion deseada para el cabezal referida al sistema de referencia de la herramienta. Este sistema de referencia estara situado en el TCP, y lo anteriormente indicado sera cierto siempre y cuando se considere este fijado a dicho punto y no experimente variaciones debido a la inclinacion de la herramienta.

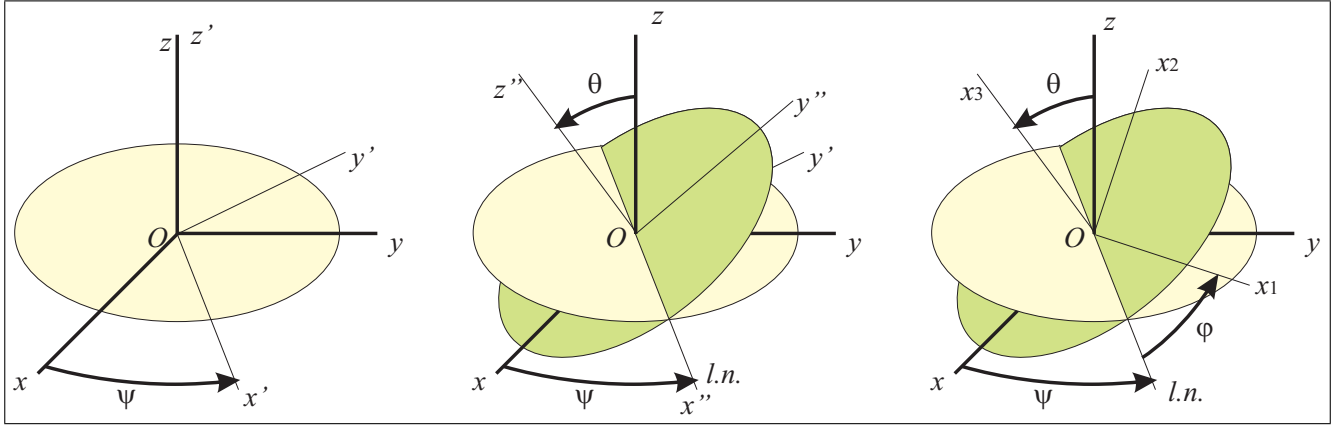
A.2.1. Angulos de Euler.

Los ángulos de Euler se utilizan para definir la orientación de un sistema de ejes cartesianos $Ox_1x_2x_3$ respecto del que tomamos como referencia $Oxyz$ mediante tres rotaciones sucesivas:

1º) rotación de ángulo ψ alrededor de Oz , **precesión**. $\psi \in [0, 2\pi]$

2ª) rotación de ángulo θ alrededor de la posición que ocupa Ox_1 en ese instante (línea nodal), **nutación**. $\theta \in [0, \pi]$

3ª) rotación de ángulo φ alrededor de Ox_3 , **rotación propia**. $\varphi \in [0, 2\pi]$



Los dos primeros giros sirven para colocar en su posición el tercer eje, después un giro alrededor de esa dirección permite situar los ejes primero y segundo. Si conocemos la orientación de los dos sistemas los ángulos de Euler se determinan en la forma siguiente:

- El ángulo de nutación θ es el formado por los ejes Oz y Ox_3 . Toma valores entre 0 y π .
- La línea nodal es perpendicular a los dos ejes anteriores y tiene el sentido de la regla de la mano derecha para ir del eje Oz al Ox_3 . La línea nodal pertenece a los planos Oxy y Ox_1x_2 .
- El ángulo de precesión ψ es el que va desde el eje Ox a la línea nodal.
- El ángulo de rotación propia φ es el que va desde la línea nodal al eje Ox_1 .

Las coordenadas de cualquier vector \mathbf{v} en el sistema girado se obtienen en función de las coordenadas en el sistema fijo por:

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}$$

siendo R la matriz de rotación

$$\begin{aligned} R &= \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \cos \psi \cos \varphi - \sin \psi \cos \theta \sin \varphi & \sin \psi \cos \varphi + \cos \psi \cos \theta \sin \varphi & \sin \theta \sin \varphi \\ -\cos \psi \sin \varphi - \sin \psi \cos \theta \cos \varphi & -\sin \psi \sin \varphi + \cos \psi \cos \theta \cos \varphi & \sin \theta \cos \varphi \\ \sin \psi \sin \theta & -\cos \psi \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \end{aligned}$$

La inversa coincide con la traspuesta y con el producto en orden inverso de los ángulos $(-\theta, -\psi, -\varphi)$,

$$R^{-1} = R^t = \begin{pmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

A.2.2. Eje de rotacion y angulo girado.

Los tres giros de Euler equivalen a una única rotación de ángulo Φ alrededor de un eje definido por el vector unitario $\hat{\mathbf{n}}$, siendo

$$\cos \frac{\Phi}{2} = \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi + \varphi}{2}$$

y

$$\begin{cases} n_x = \frac{\sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi - \varphi}{2}}{\sin \frac{\Phi}{2}} \\ n_y = \frac{\sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi - \varphi}{2}}{\sin \frac{\Phi}{2}} \\ n_z = \frac{\cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi + \varphi}{2}}{\sin \frac{\Phi}{2}} \end{cases}$$

A.2.3. Determinacion de los angulos de Euler desde la matriz de rotacion.

Los ángulos de Euler pueden determinarse a partir de la matriz de rotación por el procedimiento siguiente:

- El ángulo θ se obtiene del elemento $(3, 3)$ de la matriz de rotación R ,

$$\theta = \arccos [R(3, 3)] \quad \in [0, \pi]$$

- Si $\theta = 0$ las otras dos rotaciones son paralelas y entonces:

$$\psi + \varphi = \arctan \left[\frac{R(2, 1)}{R(1, 1)} \right]$$

- Si $\theta = \pi$ entonces:

$$\psi - \varphi = \arctan \left[\frac{R(2, 1)}{R(1, 1)} \right]$$

- Si $\theta \neq 0$ entonces:

$$\begin{aligned} \psi &= \arctan \left[\frac{R(1, 3)/\sin \theta}{-R(2, 3)/\sin \theta} \right] \\ \varphi &= \arctan \left[\frac{R(3, 1)/\sin \theta}{R(3, 2)/\sin \theta} \right] \end{aligned}$$

Nota. Las arcotangentes deben realizarse con la función `atan2` que proporciona un resultado en el rango $[-\pi, +\pi]$.

A.3. Cuaternios

Para definir la rotacion y orientacion del TCP respecto del sistema de referencia absoluto del robot, de modo general, se empleara una entidad matematica llamada cuaternio, siendo cierto tambien en el caso particular descrito para el modelo de robot concreto que se detalla en el presente trabajo.

Los cuaternios (también conocidos como *cuaterniones*) son una extensión de los números reales, similar a la de los números complejos [36]. Mientras que los números complejos son una

extensión de los reales por la adición de la unidad imaginaria i , tal que $i^2 = -1$, los cuaterniones son una extensión generada de manera análoga añadiendo las unidades imaginarias: i , j y k a los números reales y tal que

$$i^2 = j^2 = k^2 = ijk = -1$$

. Esto se puede resumir en esta tabla de multiplicación llamada Tabla de Cayley.

	1	i	j	k
1	1	i	j	k
i	i	-1	k	$-j$
j	j	$-k$	-1	i
k	k	j	$-i$	-1

$1, i, j, k$, son entonces las "bases" de las componentes de un cuaternión.

Así, un cuaternión puede expresarse como el conjunto

$$q = a + bi + cj + dk$$

donde a, b, c , y d son números reales. Este cuaternión se puede representar por medio de una matriz compleja de 2x2:

$$\begin{pmatrix} a + bi & c + di \\ -c + di & a - bi \end{pmatrix}$$

donde es fácil ver que el determinante es igual al módulo

$$a^2 + b^2 + c^2 + d^2 = \|q\|^2$$

La adición se realiza análogamente a como se hace con los complejos, es decir: término a término:

$$a + b = (a_1 + b_1) + (a_2 + b_2)i + (a_3 + b_3)j + (a_4 + b_4)k$$

El producto se realiza componente a componente, y está dado por:

$$ab = (\alpha, \vec{a}) (\beta, \vec{b}) = (\alpha\beta - \vec{a} \cdot \vec{b}, \alpha\vec{b} + \vec{a}\beta + \vec{a} \times \vec{b})$$

El producto entre cuaterniones es asociativo y no es conmutativo.

El conjugado de un cuaternión $x = x_1 + x_2i + x_3j + x_4k$ está dado por $\bar{x} = x_1 - x_2i - x_3j - x_4k$. En otras palabras, el conjugado invierte el signo de los componentes "agregados" del cuaternión. Matricialmente esto corresponderá a la operación de transposición.

La medida o valor absoluto de un cuaternión x está dado por:

$$\|x\| = \sqrt{x\bar{x}} = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2}$$

Matricialmente, esta medida coincide con la raíz cuadrada del determinante de la matriz que representa al cuaternión. Esta medida cumple una propiedad similar al módulo de un número complejo: $|zw| = |w||z|$ para cualesquiera cuaterniones z y w .

El inverso multiplicativo de un cuaternión x , distinto de cero, está dado por:

$$x^{-1} = \frac{\bar{x}}{x\bar{x}} = \frac{\bar{x}}{\|x\|^2}$$

. El cual es mismo patrón que cumplen los números complejos.

Usando la forma del inverso, es posible escribir el cociente de dos cuaterniones como:

$$\frac{a}{b} = \frac{a\bar{b}}{\|b\|^2}$$

También es posible utilizar una representación módulo-argumento

$$q = a + b i + c j + d k = \rho \left[\cos \theta + \frac{b i + c j + d k}{\sqrt{b^2 + c^2 + d^2}} \sin \theta \right] = \rho e^{\left[\theta \frac{b i + c j + d k}{\sqrt{b^2 + c^2 + d^2}} \right]}$$

donde $\rho = \|q\|$ y $\tan \theta = \frac{\sqrt{b^2 + c^2 + d^2}}{a}$.

La exponenciación de números cuaterniónicos, al igual que sucede con los números complejos, está relacionada con funciones trigonométricas:

$$e^q = e^a \left[\cos \sqrt{b^2 + c^2 + d^2} + \frac{b i + c j + d k}{\sqrt{b^2 + c^2 + d^2}} \sin \sqrt{b^2 + c^2 + d^2} \right]$$

A.3.1. Expresión de una rotación mediante un cuaternio

Los cuaterniones unitarios proporcionan una notación matemática para representar las orientaciones y las rotaciones de objetos en tres dimensiones. Comparados con los ángulos de Euler, son más simples de componer y evitan el problema del *gimbal lock*. Comparados con las matrices de rotación, son más eficientes y más estables numéricamente, desde un punto de vista puramente computacional estas cualidades explican su frecuente utilización en sistemas robóticos.

Si mediante una rotación de ángulo Φ alrededor del vector unitario $\hat{\mathbf{n}}$ se pasa de un sistema 0 a un sistema 1, el cuaternio estaría definido por:

$$(q_0, q_1, q_2, q_3) = \left(\cos \frac{\Phi}{2}, \sin \frac{\Phi}{2} \hat{\mathbf{n}} \right) = \left(\cos \frac{\Phi}{2}, \sin \frac{\Phi}{2} u_x, \sin \frac{\Phi}{2} u_y, \sin \frac{\Phi}{2} u_z \right)$$

La matriz de rotación sería,

$${}^0R_1 = 2 \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - \frac{1}{2} & q_1 q_2 - q_3 q_0 & q_1 q_3 + q_2 q_0 \\ q_1 q_2 + q_3 q_0 & q_0^2 + q_2^2 - \frac{1}{2} & q_2 q_3 - q_1 q_0 \\ q_1 q_3 - q_2 q_0 & q_2 q_3 + q_1 q_0 & q_0^2 + q_3^2 - \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

,

La relación con los ángulos de Euler (ψ, θ, φ) vendría dada por

$$\begin{aligned} q_0 = \chi &= \cos \frac{\Phi}{2} = \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi + \varphi}{2} \\ q_1 = \xi &= \sin \frac{\Phi}{2} \cos \alpha = \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi - \varphi}{2} \\ q_2 = \eta &= \sin \frac{\Phi}{2} \cos \beta = \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi - \varphi}{2} \\ q_3 = \zeta &= \sin \frac{\Phi}{2} \cos \gamma = \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi + \varphi}{2} \end{aligned}$$

donde α, β y γ son los ángulos directores del vector unitario $\hat{\mathbf{n}}$.

A.4. Algoritmo Denavit-Hartenberg

Para conocer la relación existente entre los ángulos de cada uno de los ejes del robot y la posición de la herramienta, es necesario describir el movimiento de cada uno de ellos y las interacciones que tienen lugar.

El algoritmo de Denavit-Hartenberg [12, 18] permite analizar el movimiento de una cadena cinemática asociando un sistema de referencia a cada eslabón. La transformación del sistema

de coordenadas de un eslabón al siguiente se hace por medio de 4 parámetros que corresponden a un determinado convenio que permite estandarizar las ligaduras entre los eslabones.

El método para obtener los parámetros es el siguiente:

- D-H 1.- Numerar los eslabones comenzando con 1 (primer eslabón móvil de la cadena) y acabando con n (último eslabón móvil). Se numerará como eslabón 0 a la base fija del robot.
- D-H 2.- Numerar cada articulación comenzando por 1 (la correspondiente al primer grado de libertad) y acabando en n
- D-H 3.- Localizar el eje de cada articulación. Si ésta es rotativa, el eje será su propio eje de giro. Si es prismática, será el eje a lo largo del cual se produce el desplazamiento.
- D-H 4.- Para i de 0 a $n - 1$ situar el eje z_i sobre el eje de la articulación $i + 1$.
- D-H 5.- Situar el origen del sistema de la base $\{S_0\}$ en cualquier punto del eje z_0 . Los ejes x_0 e y_0 se situarán de modo que formen un sistema dextrógiro con z_0 .
- D-H 6.- Para i de 1 a $n - 1$, situar el sistema $\{S_i\}$ (solidario al eslabón i) en la intersección del eje z_i con la línea normal común a z_{i-1} y z_i . Si ambos ejes se cortasen se situaría $\{S_i\}$ en el punto de corte. Si fuesen paralelos $\{S_i\}$ se situaría en la articulación $i + 1$.
- D-H 7.- Situar x_i en la línea normal común a z_{i-1} y z_i .
- D-H 8.- Situar y_i de modo que forme un sistema dextrógiro con x_i y z_i .
- D-H 9.- Situar el sistema $\{S_n\}$ en el extremo del robot de modo que z_n coincida con la dirección de z_{n-1} y x_n sea normal a z_{n-1} y z_n .
- D-H 10.- Obtener θ_i como el ángulo que hay que girar en torno a z_{i-1} para que x_{i-1} y x_i queden paralelos.
- D-H 11.- Obtener d_i como la distancia, medida a lo largo de z_{i-1} , que habría que desplazar $\{S_{i-1}\}$ para que x_i y x_{i-1} quedasen alineados.
- D-H 12.- Obtener a_i como la distancia medida a lo largo de x_i (que ahora coincidiría con x_{i-1}) que habría que desplazar el nuevo $\{S_{i-1}\}$ para que su origen coincidiese con $\{S_i\}$.
- D-H 13.- Obtener α_i como el ángulo que habría que girar entorno a x_i (que ahora coincidiría con x_{i-1}), para que el nuevo $\{S_{i-1}\}$ coincidiese totalmente con $\{S_i\}$.
- D-H 14.- Obtener las matrices de transformación

$${}^{i-1}A_i$$

- D-H 15.- Obtener la matriz de transformación entre la base y el extremo del robot

$$A = {}^0A_n = {}^0A_1 {}^1A_2 \cdots {}^{n-1}A_n$$

- D-H 16.- La matriz A define la orientación (submatriz de rotación R) y posición (submatriz de traslación T) del extremo referido a la base en función de las n coordenadas articulares.

$$A = \left[\begin{array}{ccc|c} & & & \\ & R & & T \\ & & & \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right]$$

Figura A.1: Los cuatro parámetros DH ($\theta_i, d_i, a_i, \alpha_i$) que transforman el sistema de coordenadas $O_{i-1}x_{i-1}y_{i-1}z_{i-1}$ en el $O_ix_iy_iz_i$.

Cada transformación está compuesta de los siguientes pasos:

1. Rotación θ_i alrededor de z_{i-1}
2. Traslación d_i según z
3. Traslación a_i según x
4. Rotación α_i alrededor de x_i

Las matrices de las 4 transformaciones son:

$$\begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i & 0 \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Por tanto,

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

A.5. Características IRP 2400/16

Según la etiqueta del equipo:

Type:	IRB 2400 M2000
Version:	IRP 2400/16
Serial n°:	24-27088
Date of manufacturing:	2004-02-303
Net weight:	380 kg
Eje 1:	1.253650
Eje 2:	5.186580
Eje 3:	6.016080
Eje 4:	2.813990
Eje 5:	0.528936
Eje 6:	2.988194

A.5.1. Dimensiones

A.5.2. Cargas

El diagrama de carga de la herramienta se encuentra en la figura A.3 e incluye una inercia nominal de carga útil, J_0 de 0.060 kg m^2 para el IRB 2400/16 (también con diagrama de carga extendido).

Figura A.2: Dimensiones del robot IRB 2400/16 según [1].

Figura A.3: Diagrama de carga del robot IRB 2400/16 según [1].

Momento de inercia para el eje 5 con movimiento completo y limitado

- Eje 5 momento de inercia,

$$Ja_5 = m \cdot ((Z + 0,085)^2 + L^2) + \max(J_{Ox}, J_{Oy}) \leq 1.85 \text{ kg m}^2$$

- Eje 6 momento de inercia,

$$Ja_6 = m \cdot L^2 + J_{Oz} \leq 1.05 \text{ kg m}^2$$

donde m es la masa en kg, el centro de gravedad (Z y L) en metros y los momentos de inercia (J_{Ox} , J_{Oy} , J_{Oz}) en kg m^2 , $L = \sqrt{x^2 + y^2}$.

A.5.3. Rangos y velocidades

Los rangos y velocidades de los 6 ejes se encuentran en la tabla A.5.3

Cuadro A.1: Rangos y velocidades de los 6 ejes del IRB 2400/16.

Capacidad máx. de manejo	20 kg
Rango eje 1	-180° a 180°
Rango eje 2	-110° a 110°
Rango eje 3	-60° a 65°
Rango eje 4	-200° a 220° (ilimitado opcional)
Rango eje 5	-120° a 120°
Rango eje 6	-400° a 400°
Velocidad máxima eje 1	150° s^{-1}
Velocidad máxima eje 1	150° s^{-1}
Velocidad máxima eje 1	150° s^{-1}
Velocidad máxima eje 1	360° s^{-1}
Velocidad máxima eje 1	360° s^{-1}
Velocidad máxima eje 1	450° s^{-1}

A.6. Características IRBP 500A

Según la etiqueta del equipo:

Los valores siguientes se han obtenido de [2].

A.6.1. Datos técnicos

Se encuentran en la tabla A.2.

Type:	IRBP
Version:	IRBP 500A
Height:	$H = 700$
Diameter:	$D = 1000(A)$
Serial n°:	PO-63187
Date of manufacturing:	2010-08-31
Net weight:	938 kg

Cuadro A.2: Datos técnicos del IRBP 500A obtenidos de [2].

Capacidad máx. de manejo	500 kg
Par continuo máximo	650 N m
Centro de gravedad	Consulte la tabla de cargas
Momento de doblado máx.	3300 N m
Tiempo de posicionamiento 90 grados	Eje 1 de 1.5 a 2.1 s Eje 2 de 1.2 a 1.6 s
Tiempo de posicionamiento 180 grados	Eje 1 de 2.3 a 3.5 s Eje 2 de 1.8 a 2.5 s
Tiempo de posicionamiento 360 grados	Eje 1 de 4.4 a 4.9 s Eje 2 de 3.1 a 3.4 s
Área de trabajo	Eje 1 = $\pm 181^\circ$
Exactitud de repetición con cargas iguales y un radio de 500 mm	± 0.1 mm
Velocidad máx. de rotación	Eje 1, 25 rpm = 90° s^{-1} Eje 2, 30 rpm = 150° s^{-1}
Tiempo de paro con un paro de emergencia	< 0.5 s
Peso	de 940 a 990 kg

A.6.2. Tabla de cargas

Las tablas muestran el máximo permitido en cuanto a desplazamiento del centro de gravedad desde el centro de rotación y la placa frontal de la unidad giratoria con distintas cargas.

Peso de la pieza de trabajo incluido el accesorio (kg)	500	450	400	350	300	250	200	150
ØD (mm)	265	294	331	379	442	530	663	888
H (mm)	673	748	841	950	950	950	950	950

A.6.3. Dimensiones

A.7. Formato STL

El formato más habitual en sistemas de prototipado rápido es el STL (Stereolithography), siendo un fichero de salida estándar para la mayor parte de los programas CAD (Diseño Asistido por Ordenador). Este tipo de archivo es una representación de la geometría de una superficie tridimensional, utilizándose una malla de pequeños triángulos para definir la forma del objeto. Para que un objeto definido en un archivo STL se construya correctamente los triángulos

Figura A.4: Gráfico para la tabla de cargas del IRBP 500A, diámetro 1450 mm.

Figura A.5: Alzado del IRBP 500A/750A diámetro 1000 mm. En nuestro caso $A = 700$ mm, $B = 1110$ mm y $C = 100$ mm.

deben encajar perfectamente entre ellos sin huecos ni superposiciones, y para representar cualquier superficie curvada se necesita gran cantidad de ellos, especialmente si se quiere conseguir una curva suave. Dadas las diferencias entre el formato STL y los formatos 3D de origen, las conversiones pueden dejar fallos estructurales en el modelo, siendo este uno de los principales problemas que se han encontrado a la hora de generar un algoritmo general que permita realizar los cortes de cada uno de los planos. Cada uno de los triángulos (facet) se define unívocamente mediante un vector unitario perpendicular al plano que describe el triángulo (normal) y tres puntos que indican sus vértices (vertex), puesto que tanto el vector como los puntos se define a partir de tres coordenadas espaciales, se almacenaran 12 valores tipo float de 4 bytes por triángulo

A.7.1. Especificaciones de formato

- Regla de orientación de las entidades tipo facet: Como se ha explicado antes, el conjunto de entidades tipo facet definen objetos mediante superficies tridimensionales, siendo cada triángulo parte de la frontera que define la separación entre el interior y exterior de dichos objetos. La orientación, esto es, que lado es dentro y que lado es fuera, se define de modo redundante de dos maneras. Primero, el sentido del vector unitario o normal apuntara hacia el exterior. Segundo, los vértices estarán ordenados en sentido antihorario (CCW) cuando se mira el objeto desde el exterior, esto es, aplicando la regla de la mano derecha. Un error común de los ficheros STL es que las normales estén incorrectamente orientadas. El signo visible de una normal invertida se confunde fácilmente con un hueco o agujero en el objeto.
- Regla de vértice a vértice: Cada triángulo debe compartir dos vértices con cada uno de los triángulos adyacentes, o lo que es lo mismo, el vértice de un triángulo no puede estar contenido en el lado de otro triángulo. El error más común en un archivo STL es que no respete esta regla siendo la causa típica de que queden agujeros.

El objeto estará definido de modo que todas las coordenadas de los vértices deben tener valor igual o mayor que cero y vendrán dadas en unidades arbitrarias, ya que el formato no contiene ningún tipo de información de escala.

Figura A.6: Planta del IRBP 500A/750A diámetro 1000 mm.

Figura A.7: Plato del IRBP 500A/750A.

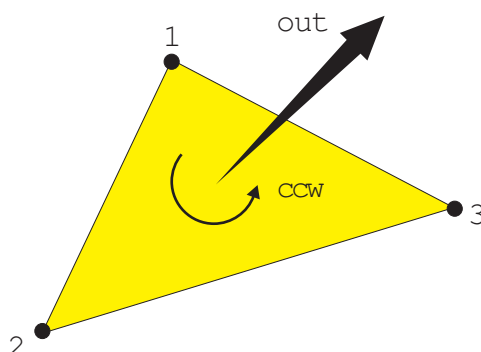


Figura A.8: Ejemplo de orientación correcta para una entidad tipo facet

A.7.2. Modos de almacenamiento

Los datos se pueden almacenar en formato STL en modo ASCII o modo binario. Ambos guardaran la misma información pero el primero de ellos puede ser fácilmente leído y editado ya que esta escrito en texto plano, mientras que el otro esta escrito en binario, ocupando menos espacio pero impidiendo su lectura de modo directo.

- Formato ASCII STL: El formato ASCII se emplea fundamentalmente para comprobar el funcionamiento de la herramienta de exportación de aplicaciones CAD, dado que su gran tamaño los hace poco prácticos para su uso general. La sintaxis de este formato es la siguiente:

```
solid name
    {
        facet normal  $n_i n_j n_k$ 
        outer loop
            vertex  $v1_x v1_y v1_z$ 
            vertex  $v2_x v2_y v2_z$ 
            vertex  $v3_x v3_y v3_z$ 
        endloop
    }
endfacet
endsolid
```

Las palabras reservadas son las que aparecen en negrita y deben escribirse con minúsculas. La indentación debe hacerse con espacios en blanco, no estando permitido el uso de tabuladores. La notación $\{\dots\}^+$ indica que el contenido entre llaves puede repetirse una vez o mas. Los símbolos escritos con letra *itálica* son variables que serán sustituidas por los valores correspondientes a cada uno de los triángulos. Los datos numéricos que aparecen después de las palabras reservadas facet normal y vertex son floats de precisión simple, por ejemplo, 1.23456E+789. Los valores asociados a facet normal pueden llevar un signo menos, mientras que los asociados a vertex, como se ha comentado antes, no puede llevarlo. El ejemplo siguiente sería la representación de un cubo en este formato:

```
solid MYSOLID
    facet normal 0.0 0.0 -1.0
```

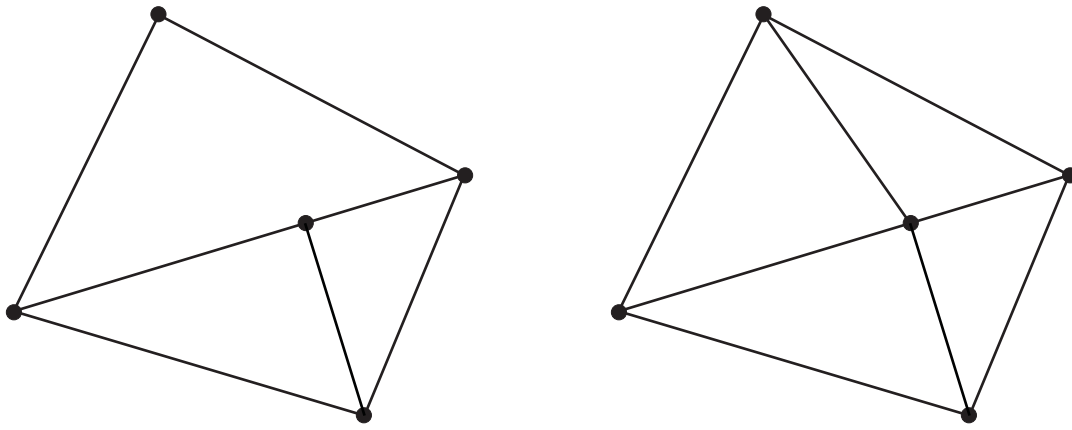


Figura A.9: La imagen de la izquierda viola la regla de vértice a vértice, mientras que la de la derecha muestra el modo correcto de construcción

```

outer loop
  vertex 0.0 0.0 0.0
  vertex 1.0 1.0 0.0
  vertex 1.0 0.0 0.0
endloop
endfacet
facet normal 0.0 0.0 -1.0
  outer loop
    vertex 0.0 0.0 0.0
    vertex 0.0 1.0 0.0
    vertex 1.0 1.0 0.0
  endloop
endfacet
facet normal -1.0 0.0 0.0
  outer loop
    vertex 0.0 0.0 0.0
    vertex 0.0 1.0 1.0
    vertex 0.0 1.0 0.0
  endloop
endfacet
facet normal -1.0 0.0 0.0
  outer loop
    vertex 0.0 0.0 0.0
    vertex 0.0 0.0 1.0
    vertex 0.0 1.0 1.0
  endloop
endfacet
facet normal 0.0 1.0 0.0
  outer loop
    vertex 0.0 1.0 0.0
    vertex 1.0 1.0 1.0
    vertex 1.0 1.0 0.0
  endloop
endfacet

```

```

facet normal 0.0 1.0 0.0
  outer loop
    vertex 0.0 1.0 0.0
    vertex 0.0 1.0 1.0
    vertex 1.0 1.0 1.0
  endloop
endfacet
facet normal 1.0 0.0 0.0
  outer loop
    vertex 1.0 0.0 0.0
    vertex 1.0 1.0 0.0
    vertex 1.0 1.0 1.0
  endloop
endfacet
facet normal 1.0 0.0 0.0
  outer loop
    vertex 1.0 0.0 0.0
    vertex 1.0 1.0 1.0
    vertex 1.0 0.0 1.0
  endloop
endfacet
facet normal 0.0 -1.0 0.0
  outer loop
    vertex 0.0 0.0 0.0
    vertex 1.0 0.0 0.0
    vertex 1.0 0.0 1.0
  endloop
endfacet
facet normal 0.0 -1.0 0.0
  outer loop
    vertex 0.0 0.0 0.0
    vertex 1.0 0.0 1.0
    vertex 0.0 0.0 1.0
  endloop
endfacet
facet normal 0.0 0.0 1.0
  outer loop
    vertex 0.0 0.0 1.0
    vertex 1.0 0.0 1.0
    vertex 1.0 1.0 1.0
  endloop
endfacet
facet normal 0.0 0.0 1.0
  outer loop
    vertex 0.0 0.0 1.0
    vertex 1.0 1.0 1.0
    vertex 0.0 1.0 1.0
  endloop
endfacet
endsolid MYSOLID

```

- Formato Binario STL: El formato binario usa la representación de números enteros y de punto flotante del IEEE, y se emplea mucho más que el anterior por su menor tamaño. La sintaxis de este formato es la siguiente:

Bytes	Data Type	Description
80	ASCII	Header. No Data Significance
4	unsigned integer	Number of facets in file
$\left\{ \begin{array}{ll} 4 & \text{float} & i \text{ for normal} \\ 4 & \text{float} & j \text{ for normal} \\ 4 & \text{float} & k \text{ for normal} \\ \\ 4 & \text{float} & x \text{ for vertex 1} \\ 4 & \text{float} & y \text{ for vertex 1} \\ 4 & \text{float} & z \text{ for vertex 1} \\ \\ 4 & \text{float} & x \text{ for vertex 2} \\ 4 & \text{float} & y \text{ for vertex 2} \\ 4 & \text{float} & z \text{ for vertex 2} \\ \\ 4 & \text{float} & x \text{ for vertex 3} \\ 4 & \text{float} & y \text{ for vertex 3} \\ 4 & \text{float} & z \text{ for vertex 3} \\ \\ 2 & \text{unsigned integer} & \text{Attribute byte count} \end{array} \right\}^+$		

La notación $\{\dots\}^+$ indica que el contenido entre llaves puede repetirse una vez o mas. El valor Attribute byte count debería estar establecido a cero. El ejemplo siguiente sería la representación de un cubo en este formato, con los valores de bytes en hexadecimal en la columna central y la representación en ASCII en la columna de la derecha:

```

0000:0000 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20
0000:0010 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20
0000:0020 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20
0000:0030 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20
0000:0040 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20
0000:0050 0c 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 80 3f .....?
0000:0060 00 00 00 bf 00 00 00 bf 00 00 80 3f 00 00 00 3f ...¿...¿...?...?
0000:0070 00 00 00 bf 00 00 80 3f 00 00 00 3f 00 00 00 3f ...¿...?...?...?
0000:0080 00 00 80 3f 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 ...?...
0000:0090 80 3f 00 00 00 bf 00 00 00 bf 00 00 80 3f 00 00 .?...¿...¿...?...?
0000:00a0 00 3f 00 00 00 3f 00 00 80 3f 00 00 00 bf 00 00 .?...?...?...?...¿..
0000:00b0 00 3f 00 00 80 3f 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 .?...?...
0000:00c0 00 00 80 bf 00 00 00 3f 00 00 00 bf 00 00 00 00 ...¿...?...¿....
0000:00d0 00 00 00 bf 00 00 00 bf 00 00 00 00 00 00 00 bf ...¿...¿.....¿
0000:00e0 00 00 00 3f 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 ...?...
0000:00f0 00 00 00 00 80 bf 00 00 00 3f 00 00 00 bf 00 00 .....¿...?...¿..
0000:0100 00 00 00 00 00 bf 00 00 00 3f 00 00 00 00 00 00 .....¿...?...
0000:0110 00 3f 00 00 00 3f 00 00 00 00 00 00 00 00 80 bf .?...?...¿...¿
0000:0120 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 bf 00 00 00 bf .....¿...¿
0000:0130 00 00 00 00 00 00 00 bf 00 00 00 bf 00 00 80 3f .....¿...¿...?
0000:0140 00 00 00 bf 00 00 00 3f 00 00 80 3f 00 00 00 00 ...¿...?...?...

```

```

0000:0150 80 bf 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 bf 00 00 .j.....j..
0000:0160 00 bf 00 00 00 00 00 00 00 bf 00 00 00 3f 00 00 .j.....j...?..
0000:0170 80 3f 00 00 00 bf 00 00 00 3f 00 00 00 00 00 00 .?...j...?.....
0000:0180 00 00 80 3f 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 3f ...?...?.....?
0000:0190 00 00 00 bf 00 00 80 3f 00 00 00 3f 00 00 00 bf ...j...?...?...j
0000:01a0 00 00 00 00 00 00 00 00 3f 00 00 00 3f 00 00 00 .....?...?...
0000:01b0 00 00 00 00 80 3f 00 00 00 00 00 00 00 00 00 .....?...
0000:01c0 00 3f 00 00 00 bf 00 00 80 3f 00 00 00 3f 00 00 .?...j...?...?...
0000:01d0 00 3f 00 00 00 00 00 00 00 3f 00 00 00 3f 00 00 .?...?...?...?...
0000:01e0 80 3f 00 00 00 00 00 00 00 00 80 bf 00 00 00 00 .?...j....
0000:01f0 00 00 00 bf 00 00 00 bf 00 00 00 00 00 00 00 3f ...j...j.....?
0000:0200 00 00 00 bf 00 00 00 00 00 00 00 00 3f 00 00 00 bf ...j.....?...j
0000:0210 00 00 80 3f 00 00 00 00 00 00 00 00 80 bf 00 00 ...?...j...
0000:0220 00 00 00 00 00 bf 00 00 00 bf 00 00 00 00 00 00 .....j...j.....
0000:0230 00 3f 00 00 00 bf 00 00 80 3f 00 00 00 bf 00 00 .?...j...?...j..
0000:0240 00 bf 00 00 80 3f 00 00 00 00 00 00 00 00 80 3f .j...?...?...?
0000:0250 00 00 00 00 00 00 00 bf 00 00 00 3f 00 00 80 3f .....j...?...?
0000:0260 00 00 00 3f 00 00 00 3f 00 00 80 3f 00 00 00 3f ...?...?...?...?
0000:0270 00 00 00 3f 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00 ...?...
0000:0280 80 3f 00 00 00 00 00 00 00 bf 00 00 00 3f 00 00 .?...j...?...?
0000:0290 80 3f 00 00 00 3f 00 00 00 3f 00 00 00 00 00 .?...?...?...
0000:02a0 00 bf 00 00 00 3f 00 00 00 00 00 00 .j...?...

```